Grupo A. Temas generales
Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección

Tema 25. El vuelo fotogramétrico: Planificación del vuelo fotogramétrico. Elección de la altura de vuelo y escala del mapa. Parámetros del plan de vuelo vertical, recubrimientos. Falta de verticalidad. Deriva. Movimiento de la imagen. Vuelo asistido con GPS y vuelo con sistema GPS/INS.

Tema 26. El modelo geométrico en fotogrametría: Modelo geométrico básico. Sistema de referencia imagen. Alteraciones en la métrica de la imagen: factores físicos, influencia de la cámara métrica, del avión y de la película. Calibrado de cámaras métricas analógicas. Correcciones a las foto-coordenadas.

Tema 27. Geometría de la foto inclinada: Sistemas de referencia (t, s, α) y (κ,ϕ, ω). Cambios de sistemas. Escala de una foto inclinada. Desplazamientos en la imagen debidos a la inclinación y el relieve.

Tema 28. Fundamentos de la fotogrametría analítica: Ecuaciones de colinealidad. Linealización de las ecuaciones de colinealidad. Modelo matemático y resolución del sistema de ecuaciones. Condición de coplanariedad. Distintos casos de creación analítica de modelos. Solución de los problemas fotogramétricos de intersección inversa, intersección directa y orientación relativa.

Tema 29. Aerotriangulación analítica. Definición de aerotriangulación, diseño de bloques de aerotriangulación. Métodos de compensación de bloques de aerotriangulación. Ajuste de modelos independientes. Compensación por el método de haces. Modelo funcional, modelo estocástico y modelo matemático del ajuste de haces. Aplicaciones, ventajas y desventajas del método de haces.

Tema 30. Fuentes de error en un ajuste de aerotriangulación: Concepto de Autocalibración y tratamiento de errores sistemáticos. Ajuste de bloque con parámetros adicionales. Modelo de Brown, modelo geométrico, otros modelos. Detección automática de errores groseros. Rango de errores groseros. Estimación robusta en aerotriangulación. Modelo Klein-Förstner y modelo danés.

Tema 31. Control terrestre: Distribución de puntos de apoyo en un bloque de aerotriangulación y su influencia en la precisión del ajuste de la aerotriangulación. Precisiones de un bloque de modelos independientes. Precisiones en un bloque de haces. Fotogrametría y GPS. Ajuste combinado de aerotriangulación con GPS en el método de haces. Precisión del ajuste combinado por haces de rayos.

Tema 32. Referenciación directa en fotogrametría: Georreferenciación de imágenes aéreas. Modelo geométrico de la georreferenciación directa. Componentes del sistema integrado DGPS/IMU. Subsistema de posicionamiento cinemático GPS. Subsistema unidad de medidas inerciales (IMU). Integración del sistema DGPS/INS. Formulación del filtro Kalman. Ventajas y desventajas de la integración DGPS/INS.

Tema 33. Características de la imagen digital: Geometría y radiometría de la imagen digital. Relación entre imagen analógica y digital. Técnicas imagen híbridas (digitización, tamaño de píxel, sistema de coordenadas). Entropía, codificación y compresión de imágenes. Formatos imagen, JPEG estándar de compresión de imágenes raster en estaciones digitales. Formatos digitales utilizados en fotogrametría digital.

Tema 34. Definición automática de superficies objeto: Operadores interés en fotogrametría. Algoritmos de correlación de imágenes en fotogrametría digital. Correlación o Matching basado en el área (ABM) por mínimos cuadrados. Determinación de escenas homólogas basado en entidades o características (FBM). Correlación automática en el espacio objeto por mínimos cuadrados. Matching relacional o correlación simbólica.

Tema 35. Procesos de medida de coordenadas imagen en fotogrametría digital: Localización de marcas fiduciales (orientación interna). Orientaciones relativas y absolutas. Orientación externa. Soluciones a la aerotriangulación aérea digital. Control de calidad de los resultados de la aerotriangulación digital.

Tema 36. Sensores de estado sólido en fotogrametría: Fundamentos de los sensores de imagen y características de los sensores CCD. Escáneres fotogramétricos: tipos de escáneres, características generales y calibración. La cámara métrica digital: diseño, características y calibración. Barredores lineales: fundamento y características. Ventajas e inconvenientes de los barredores lineales respecto a las cámaras métricas digitales.

Tema 37. Estaciones fotogramétricas digitales: Características y esquema general. Distintos sistemas de visión estereoscópica. Procesos de restitución. Superposición de ficheros. Aplicaciones en control de calidad y actualización cartográfica.

Tema 38. Modelos digitales del terreno: Características. Obtención por técnicas fotogramétricas digitales. Estrategias: geometría epipolar, relación jerárquica de imágenes y redundancia. Precisión y control de calidad de los MDT. Corrección y edición interactiva: obtención de curvas de nivel.

Tema 39. Ortofoto digital: Concepto y fundamentos matemáticos. Calidad y precisión de la ortofoto. Modelos Digitales de Superficie. Ortofotos verdaderas. Edición y mosaicos de ortofotos.

Tema 40. Fundamentos del sensor Lidar. Concepto de rango de penetración y múltiples retornos. Sensores y plataformas. Principio del Lidar aerotransportado. Calibración y tratamiento de datos Lidar. Utilización del Lidar en la obtención del MDT y MDS. Modelos en 3D. Otras aplicaciones.

Tema 41. Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes. Plataformas y sensores. Satélites de observación de la Tierra.

Tema 42. Fundamentos físicos de la Teledetección. Radiación electromagnética, emisión e interacción con la materia. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera. Interacción con la superficie terrestre. Medida de temperaturas mediante imágenes en el infrarrojo térmico: técnicas y aplicaciones.

Tema 43. Técnicas de tratamiento de imágenes de teledetección. La imagen digital. Tratamiento digital de imágenes. Tratamientos previos. Realces y mejoras de imágenes.

Tema 44. Tratamientos radiométricos de imágenes de Teledetección. Correcciones por la geometría de la toma: topografía, BRDF. Correcciones atmosféricas. Cálculo de reflectividades. Radiometría de campo y laboratorio: técnicas, instrumentos y aplicaciones.

Tema 45. Corrección geométrica de imágenes de satélite: modelo polinomial, modelo paramétrico, "Rational Polinomial Coefficients". Remuestreo. Ajuste en bloque de imágenes de satélite. Aplicaciones topográficas. Equilibrado radiométrico y mosaico. Obtención de MDE por correlación automática de imágenes. Sensores de alta resolución para cartografía. Cartografía de imagen: ortoimágenes. Actualización de cartografía.

Tema 46. Clasificación automática de imágenes multiespectrales: Clasificación no supervisada y supervisada. Clasificación mediante segmentación de objetos. Clasificación mediante sistemas expertos, redes neuronales, subpixel, análisis textural, fuzzy. Análisis de resultados. Fuentes de error. Medidas de la fiabilidad. Técnicas de revisión por muestreo. Análisis estadístico de la matriz de confusión.

Tema 47. Teledetección por Radar: Principios. Sistema radar de apertura sintética. Resoluciones. Obtención de imágenes. Sensores y plataformas más utilizados. Técnicas de tratamiento. Aplicaciones. Interferometría. Obtención de Modelos de Elevaciones de imagen radar mediante INSAR. Estudios de subsidencias.

Tema 48. Normalización y difusión de la información de Teledetección: Estándares ISO y OGC aplicables a imágenes. Formatos, Metadatos. Los datos ráster en las Infraestructuras de Datos Espaciales. Servidores de imágenes en Internet. Organizaciones y Programas nacionales e internacionales de Teledetección: GEO, GEOSS, GMES, CORINE, PNOT (PNOA, SIOSE, PNT).

Tema 25. El vuelo fotogramétrico: Planificación del vuelo fotogramétrico. Elección de la altura de vuelo y escala del mapa. Parámetros del plan de vuelo vertical, recubrimientos. Falta de verticalidad. Deriva. Movimiento de la imagen. Vuelo asistido con GPS y vuelo con sistema GPS/INS.

25.1. El vuelo fotogramétrico: Planificación del vuelo fotogramétrico

La ejecución de un proyecto fotogramétrico requiere de una precisa planificación del mismo y más concretamente del vuelo fotogramétrico, que garantice que la cobertura fotográfica de la zona a levantar es la adecuada para satisfacer el objetivo del trabajo cumpliendo al mismo tiempo las especificaciones reflejadas en el pliego de condiciones.

El proyecto de vuelo es el conjunto de cálculos previos a la realización de un vuelo fotogramétrico, mediante los cuales se organizan las operaciones que permiten conseguir el fin propuesto bajo unas condiciones establecidas previamente. El objetivo del vuelo es el de cubrir una determinada zona con imágenes que cumplen los porcentajes de recubrimiento longitudinal y transversal especificados, sobrevolando la zona a una altitud determinada en función de la escala deseada y de la distancia principal de la cámara. Para conseguirlo, el avión deberá volar a una altitud constante, siguiendo una ruta predeterminada, y a una velocidad constante que permita realizar disparos a intervalos regulares que se correspondan con recorridos iguales.

En la planificación del vuelo hay que adoptar una serie de decisiones previas que condicionan las características del vuelo (escala del mapa a realizar, formato de los fotogramas, proyección del mapa, elipsoide de referencia, etc.) que se determinan, fundamentalmente, en función del **propósito** en el que se utilizarán las fotografías aéreas.

Así pues, para la obtención de planos se precisarán buenas condiciones métricas de las fotografías por lo que habrá que utilizar cámaras métricas calibradas, películas con granulometría fina, tiempos de exposición cortos y emulsiones con alta resolución. Cuando se trata de mapas topográficos es aconsejable utilizar cámaras granangulares o supergranangulares, para obtener una amplia relación base-altura (B/H).

Los **condicionantes** que influyen en la calidad de la fotografía, tanto en su aspecto geométrico como fotográfico que se consideran en esta fase son los siguientes:

- Aspectos geométricos:

  - Certificado de calibración de la cámara, que facilita los parámetros de orientación interna (distancia principal, punto principal, coordenadas de las marcas fiduciales, distorsiones).
  - Escala de la fotografía.
  - Recubrimientos longitudinales y laterales.
  - Seguridad de un recubrimiento total en toda la zona.
  - Arrastre de la imagen sobre la fotografía.
  - Horas útiles de tomas fotográficas.

- Condiciones fotográficas:

  - Contraste fotográfico de la película.
  - La calidad de la imagen.
  - La homogeneidad de tonalidad.
  - La ausencia de nubes.
  - Longitud e intensidad de las sombras.

En esta fase previa se determina el llamado **plan de vuelo** que consta de dos apartados: un mapa de vuelo, que muestra dónde deben ser tomadas las fotografías, y las especificaciones que definen cómo deben ser tomadas, incluyendo requisitos concretos como tipo de cámara, película, escala, altura de vuelo, recubrimientos, inclinaciones permitidas...etc.

El **mapa de vuelo** proporciona los límites del proyecto y los ejes de vuelo que muestran al piloto por donde debe volar para obtener el recubrimiento deseado. Este documento se prepara marcando sobre una mapa existente de la zona, el área objeto del proyecto. Calculada la dimensión del territorio correspondiente a cada foto a la escala del mapa, se indican sobre éste los correspondientes ejes de vuelos de cada pasada, cuidando de mantener el recubrimiento lateral previsto. Sobre los ejes de vuelo, y a intervalos regulares a que correspondan el recubrimiento propuesto, se señalan los puntos sobre cuya vertical deberá realizarse la exposición de la película.

Considerando un vuelo ideal, el punto central de cada fotografía coincidirá con los puntos propuestos y estarán todos sobre la misma recta en cada pasada, siendo las pasadas rigurosamente paralelas.

Si la zona es regular, los ejes de vuelos suelen estar orientados *Norte-Sur* o *Este-Oeste*, numerando las pasadas según este criterio, así como las fotografías de cada pasada.

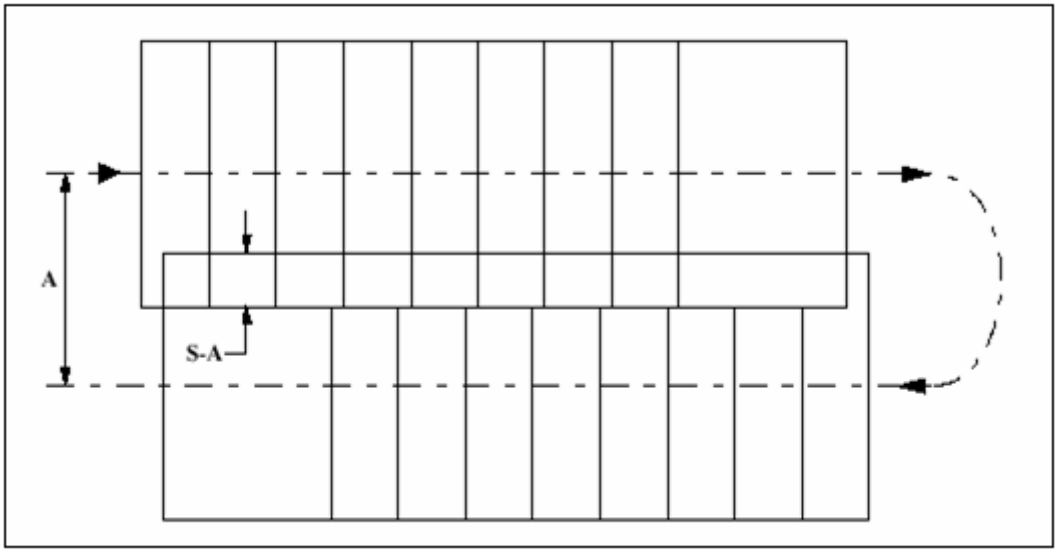


Figura 1.

Ejes de vuelo con orientación W-E y E-W

Si la zona del proyecto responde a una característica particular del terreno, es decir, tiene forma irregular, o si es larga, estrecha y girada de las direcciones cardinales (cauces de ríos, trazados de nuevas carreteras, líneas costeras,.....etc.) no resultará económico volar en las direcciones *Norte-Sur* o *Este-Oeste* (se obtendrían muchas pasadas con pocos fotogramas útiles), es evidente que habría que volar siguiendo las mayores longitudes de línea (paralelamente a los límites de la zona).

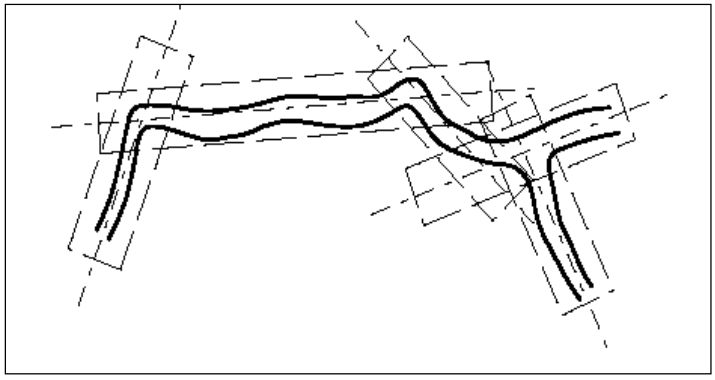


Figura 2.

Planificación de vuelo sobre zona no regular

En cualquier caso, la planificación del vuelo debe ser lo más **eficiente** posible de modo que satisfaga tanto los condicionantes de carácter técnico:

- El modelo estereoscópico presentará lo más uniforme posible una escala y unos recubrimientos, y éste será de superficie máxima.
- La fotografía aérea será tan vertical como sea posible y deberá existir una buena información para poder corregir los desplazamientos angulares, y cumplirá las condiciones propias de aplicación métrica.

como los de carácter económico:

- La cobertura de la superficie que realizará con el menor número de fotogramas posible para la escala elegida, lo que implicará un menor número de modelos y por tanto la disminución del número de trabajos.

25.2. Elección de la altura de vuelo y escala del mapa

25.2.1 Escala de la fotografía

La elección de la **escala de la fotografía** se determina en función de la escala a la que se quiere representar el mapa y del tamaño de los objetos a detectar.

La relación entre la escala de la imagen (Mb=1/mb) y la del mapa (Mk=1/mk) viene dada según el ábaco de la (Fig.2), que proporciona, para una escala dada de levantamiento (abscisas), el margen de escalas imagen que pueden utilizarse.

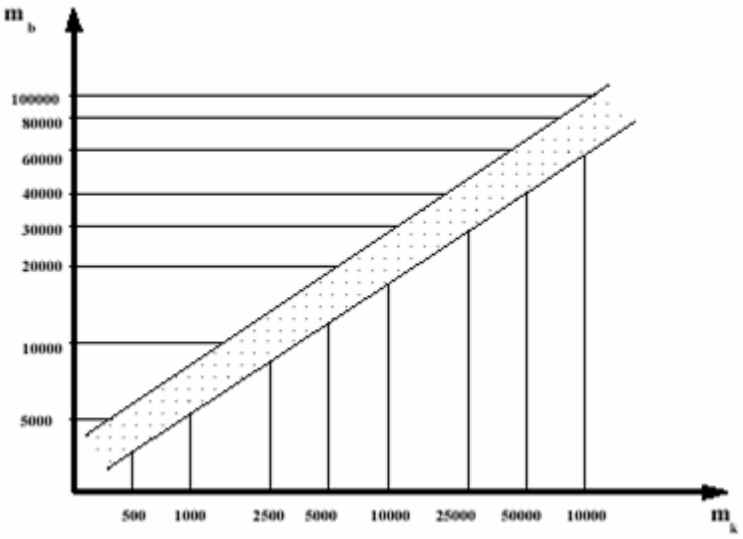


Figura 3.

Relación entre escala imagen y escala mapa

Ejemplo: Si se desea realizar un mapa a escala: $1/m_k = 1/10.000$, el rango de escalas imagen se encuentra delimitado por: $1/m_b=1/17.000$ y $1/m_b =1/27.000$.

Por otro lado la escala de la fotografía limitará la detección del tamaño de los objetos. Para la definición de un punto correspondiente a un detalle natural del terreno, con ayuda de aparatos provistos de elementos de ampliación de imagen, se admiten los siguientes valores:

- *ml = 0.02 mm* (Para un punto cualquiera en condiciones normales de observación)
- *ml = 0.01 mm* (Detalle natural muy nítido o punto de apoyo señalado artificialmente en el terreno).

Así por ejemplo, para las siguientes escalas podemos detectar el tamaño mínimo de los objetos:

1:mb	*1:5000*	*1:10000*	*1:20000*	*1:30000*
Pto natural cualquiera	0.10 m	0.20 m	0.40 m	0.60m
Pto de Apoyo	0.05 m	0.10 m	0.20 m	0.30 m

Tabla 1.

25.2.2. Altura de vuelo

Una vez determinada la escala de la imagen, y conocida la distancia principal de la cámara de la toma, al altura de vuelo sobre el terreno se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$\frac{1}{mb} = \frac{c}{H} \Rightarrow H = c\ mb$$

siendo:

m_b: denominador de la escala imagen

c: distancia principal de la cámara

H: Altura de vuelo media sobre el terreno

La altura de vuelo sobre el nivel medio del mar H_0 (dato del altímetro) vendrá dada por la altitud media del terreno respecto del nivel de referencia (H_t) y la altura de vuelo media (H)

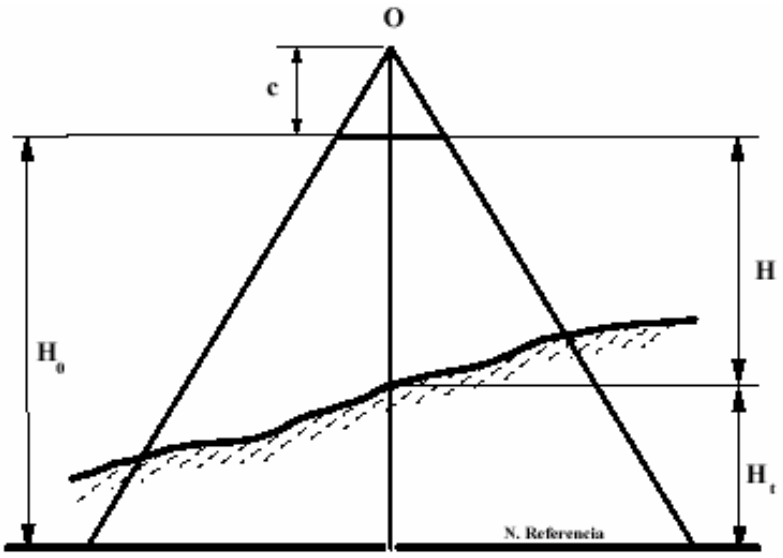


Figura 4.

Toma aérea vertical

$$Ho = H + Ht \Rightarrow Mb = \frac{1}{Mb} = \frac{c}{Ho - Ht}$$

Los mayores problemas en la planificación de un vuelo se presentan cuando el terreno es montañoso. En estos casos la altura del terreno respecto del nivel de referencia *(Ht)* deberá

escogerse, de modo que no produzca huecos en los recubrimientos entre fotografías en los puntos altos del terreno, caso de la siguiente figura donde *PB* no quedará reflejado en la segunda fotografía.

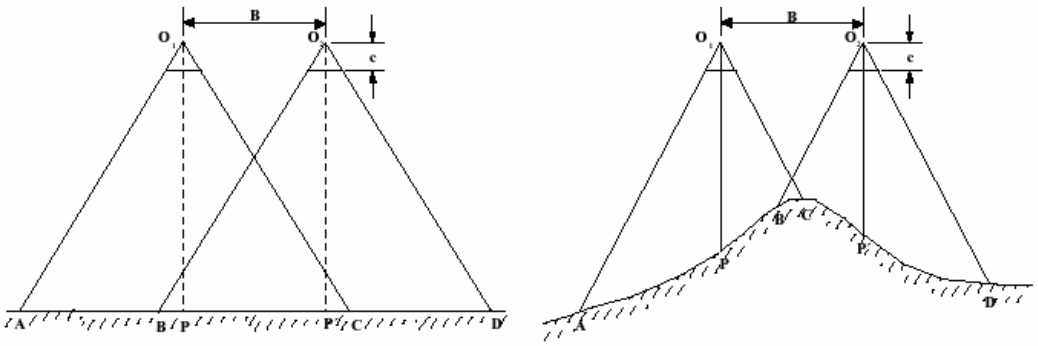
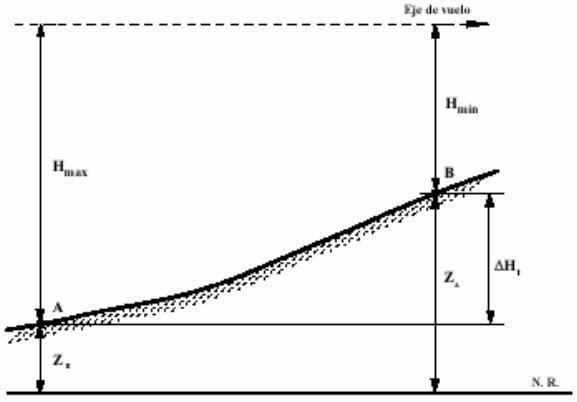


Figura 5. Defectos producidos en el recubrimiento longitudinal

En estas zonas accidentadas conviene fijar unos límites de variación del desnivel, a partir de las tolerancias fijadas para la variación de la escala (tolerancia que vendrá expresada en el Pliego de Condiciones).



$$Mb_{max} = \frac{1}{mb_{max}} = \frac{c}{H_{min}}$$

$$Mb_{min} = \frac{1}{mb_{min}} = \frac{c}{H_{max}}$$

$$mb_{min} - mb_{max} = \frac{H_{max} - H_{min}}{c} = \frac{\Delta Ht}{c}$$

$$\Delta Ht = c\left(mb_{min} - mb_{max}\right)$$

Figura 6. Cálculo de desniveles admisibles

25.3. Parámetros del vuelo vertical, recubrimientos

25.3.1. Recubrimientos.

Los recubrimientos longitudinal y transversal son dos de los parámetros fundamentales del vuelo fotogramétrico. El objeto de los recubrimientos fotográficos es el de poder aplicar el principio de la visión estereoscópica a los fotogramas aéreos. La parte común entre dos fotografías consecutivas es el modelo estereoscópico, debiendo poder enlazarse estos modelos tanto longitudinalmente como transversalmente.

- **Recubrimiento longitudinal**

Si nos encontrásemos en la **situación ideal** en la que el eje principal es estrictamente vertical, el terreno es llano y horizontal, y el avión vuela en línea recta y a una altitud constante, el trabajo que se obtendría sería una serie de fotografías a intervalos iguales, de modo que dichas fotos se alinearían formando una banda o pasada fotográfica.

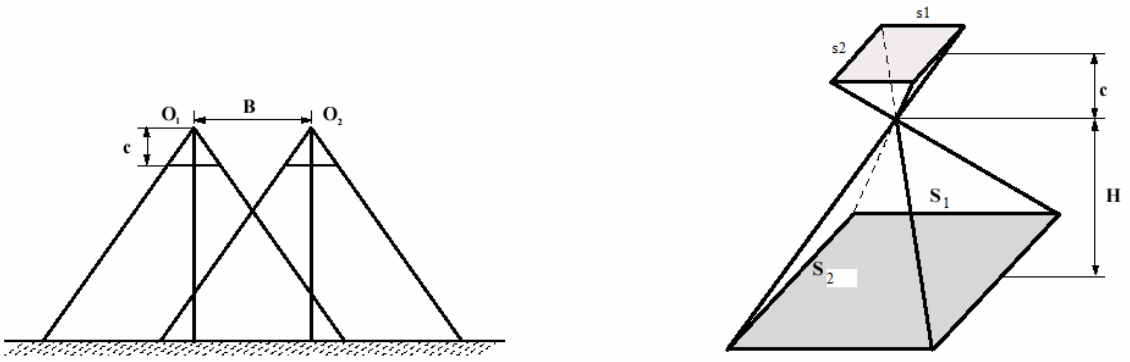


Figura 7. a) Toma de un modelo fotogramétrico. b)Superficie cubierta por una fotografía

donde:

s1= lado longitudinal del fotograma (según la dirección de vuelo)

s2= lado transversal del fotograma (perpendicular a la dirección de vuelo)

S_1= lado longitudinal en el terreno

S_2 =lado transversal en el terreno

c = distancia principal

H=altitud media sobre el terreno

B = distancia existente entre dos posiciones del objetivo consecutivas (Base).

De modo que:

$S_1 = mb\ s_1$ $S_2 = mb\ s_2$

Si *B* es la distancia recorrida entre dos exposiciones sucesivas, dos fotos sucesivas tendrán una parte común si $B \leq S_1$.

Si embargo, **en la realidad**, la forma y dimensiones de la superficie del terreno cubierta por las fotos son función de:

- La inclinación del eje vertical; si el eje de la cámara está inclinado, la superficie cubierta será trapezoidal *(Fig. A)*.
- Variaciones en la altura de vuelo *(Fig. B)*.
- El relieve del terreno; la superficie se deforma de modo irregular *(Fig. C)*.

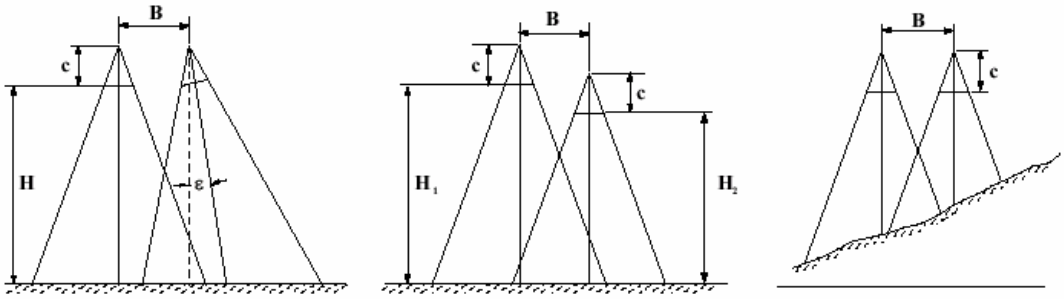


Figura 8. Figura A, Figura B y Figura C

Para asegurar que dichas alteraciones son producen defectos de recubrimiento estereoscópico, se debe elegir una base que sea menor a la mitad del lado terreno ($B < S_1/2$), es decir un recubrimiento superior al 50%, pero sin aumentar demasiado este margen ya que en caso de exceso, aumentaríamos el número de pares, disminuyendo el rendimiento y por tanto la relación *(B/H)* de la que depende la precisión.

Llamando *p%* al recubrimiento longitudinal expresado en tantos por ciento, se fija normalmente este en el 60%, con una tolerancia de ±5%.

$$B = S_1 (1 - p) = s_1 \, mb (1 - p) = s_1 \, mb \left(1 - \frac{p\%}{100} \right)$$

- **Recubrimiento lateral o transversal**

Para cubrir un territorio extenso es preciso hacer varias bandas o pasadas dispuestas lateralmente respecto a la primera. Deben ser paralelas y recubrirse de modo que no exista ningún hueco en la cobertura.

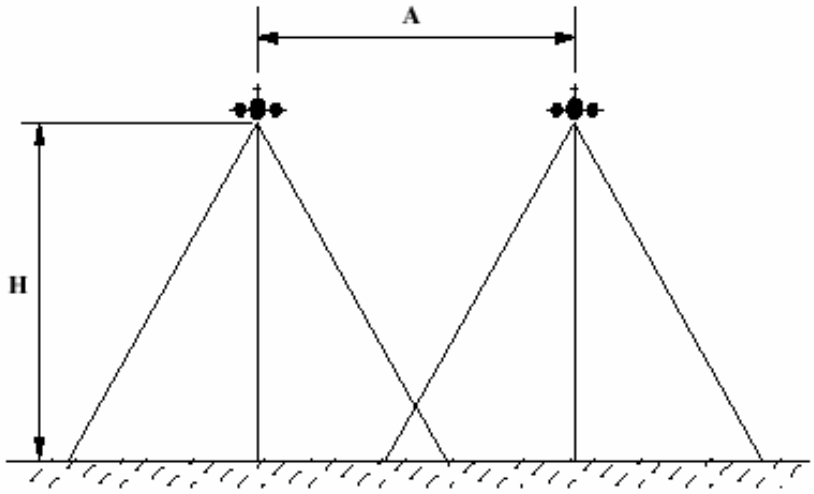


Figura 9. Recubrimiento transversal entre pasadas adyacentes

El recubrimiento lateral *(q%)* deberá ser mínimo para disminuir en lo posible el número de clichés, siendo *A* la distancia entre dos ejes de vuelo adyacentes es preciso, en terreno llano, que $A < S_2$

Los defectos de recubrimiento lateral pueden ser resultado de:

- La Inclinación del eje transversal.
- El relieve del terreno.
- Errores en el mantenimiento de la altitud.
- Error en la apreciación de la magnitud A.
- Error en la corrección de la deriva.
- Errores en el mantenimiento de una ruta constante.

Suele escogerse un recubrimiento transversal de valores comprendidos entre el 10% y el 20 %.

$$A = S_2 (1 - q) = s_2\ mb (1 - q) = s_2\ mb \left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

25.3.2. Parámetros del plan del vuelo vertical

Además de los recubrimientos existen una serie de parámetros que definen y condicionan la planificación del vuelo fotogramétrico.

Partiendo del caso ideal, en el que el avión recorre a una altura H el terreno a levantar, disparando el obturador de la cámara a intervalos regulares de tiempo de manera que cada dos fotogramas se dispone del recubrimiento adecuado, y se distribuyen sus pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas, barriendo la zona por pasadas que disponen a su vez de suficiente recubrimiento lateral para poder solapar unas con otras, se pueden definir los siguientes parámetros y relaciones entre los mismos:

s = Lado del negativo
S = Lado del negativo en el terreno
b = Fotobase
B = Base (terreno)
a = Separación entre pasadas a escala imagen
A = Separación entre pasadas (terreno)
Lp = Longitud del terreno a volar (según dirección vuelo)
Lq = Anchura del terreno a volar (transversal a la dirección de vuelo)
Fg = Superficie terreno cubierta por una foto
c = distancia principal
Vg = Velocidad del avión
P = Pto principal en O1
P' = Pto principal en O2

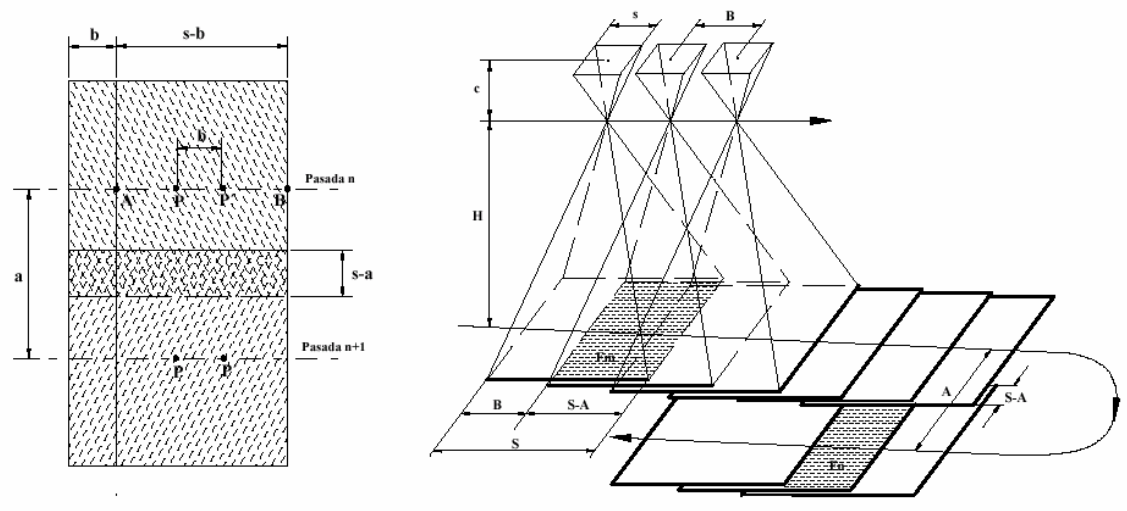


Figura 10. Caso ideal

- Recubrimiento longitudinal:

$$p = \overline{P'A} + \overline{P'B} = \overline{P'A} + \overline{PB} - \overline{PP'} = \frac{s}{2} + \frac{s}{2} - b = s - b$$

$$p\% = \frac{(s-b)100}{s}$$

- Recubrimiento transversal:

$$q\% = \frac{(s-a)100}{s}$$

- Escala de la imagen:

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} = \frac{s}{S}$$

- Altura de vuelo:

$$H = c\ mb = c\ s/S$$

- Lado de la fotografía en el terreno:

$$S = s\ mb = s\ H/c$$

- Superficie cubierta por una foto:

$$Fg = S^2 = (s\ mb)^2$$

- Longitud de la base con recubrimiento longitudinal del p%:

$$b = s\left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \quad \text{(fotobase)}$$

$$B = b\,mb = S\left(1 - \frac{p\%}{100}\right) \text{(base)}$$

- Intervalo entre pasadas, con un recubrimiento transversal de q%:

$$a = s\left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

$$A = S\left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

- Número de fotos por pasada:

$$np = \frac{Lp}{B} + 1$$

- Número de pasadas:

$$nq = \frac{Lq - S}{A} + 1$$

- Superficie estereoscópica por par:

$$Fm = (S - B)S$$

- Superficie adicional estereoscópica por par:

$$Fn = A\,B = S^2\left(1 - \frac{p\%}{100}\right)\left(1 - \frac{q\%}{100}\right)$$

- Número de fotos necesarias (supuesta la superficie uniforme):

$$nt = np\,nq$$

- Intervalo entre exposiciones (cadencia):

$$\Delta t = \frac{B}{Vg} = \frac{s\ mb}{Vg}\left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$$

Para terreno accidentado se ha de adoptar una cadencia de exposiciones variables en función del perfil del terreno a lo largo del eje de vuelo, ya que si adoptamos un intervalo constante, para las altitudes del terreno superiores a las del nivel de referencia, se tendrán recubrimientos insuficientes en las partes altas y excesivos en las bajas.

- Nitidez: Tiempo máximo de exposición (en función del desplazamiento máximo que puede sufrir la imagen Δs que suele ser $\Delta s \leq 0.03$ mm):

  $Tmáx = \Delta s / Vg$

25.4. Falta de verticalidad

La falta de verticalidad del eje óptico o inclinación del mismo produce desplazamientos en la imagen que dificultan la observación estereoscópica y por tanto la restitución sobre los modelos.

Para mantener el eje vertical se utiliza un nivel esférico que permite nivelar la cámara antes de cada exposición y cuya imagen aparece impresa en un margen de la fotografía, dando una idea de la verticalidad que realmente tuvo el eje en el momento de la toma.

Normalmente se considera que el error medio de verticalidad debe ser inferior a $\pm 1^g$.

25.5. Deriva

La deriva es el ángulo de desviación que sufre la trayectoria real que describe el avión respecto de la teórica que debiera seguir, producido como consecuencia de la influencia del viento sobre el avión.

Llamando *"azimut verdadero"* al azimut que define la dirección de la trayectoria que debiera seguir el avión en ausencia de perturbaciones, la deriva es la diferencia entre dicho azimut y el correspondiente a la trayectoria real que sigue el avión como consecuencia de la influencia del viento.

Si existiese viento, la masa de aire en la que se desplaza el avión se mueve respecto al suelo, estando sometido el avión a dos fuerzas:

- $\vec{V}_p$ = Fuerza de los motores del avión, la cual imprime una velocidad y dirección.
- $\vec{V}_v$ = Fuerza del viento.

La trayectoria del avión sería la resultante de las dos fuerzas *(Vs*), velocidad con respecto del suelo y por tanto, el ángulo entre la ruta verdadera y el acimut verdadero es la deriva *(d*).

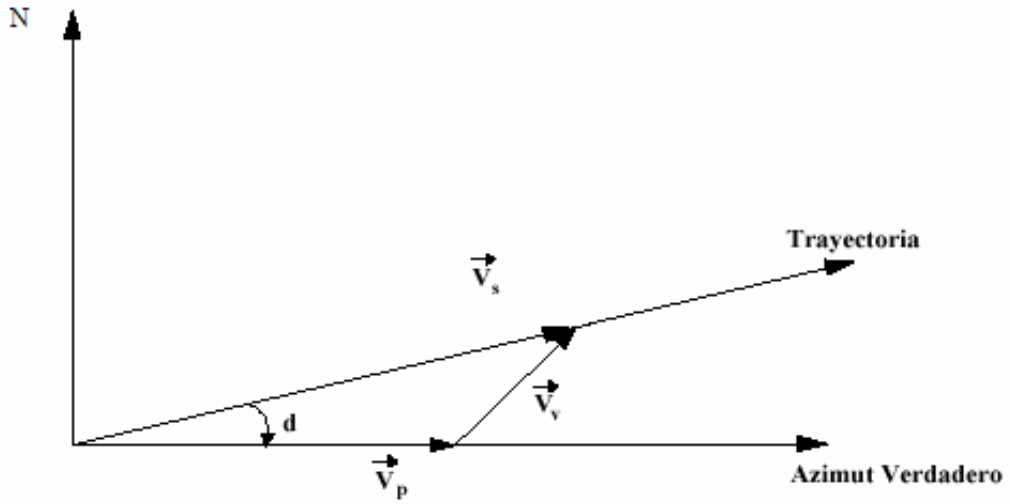


Figura 11. Efecto de la fuerza del viento sobre la trayectoria del vuelo

Si los lados del formato de la película son paralelos y perpendiculares al avión, el recubrimiento que se obtenga habrá disminuido la superficie útil a utilizar.

Para ello es preciso girar la cámara a bordo para que un lado del formato sea paralelo a la ruta verdadera, de manera que hay que determinar constantemente el ángulo de deriva *(d)* y girar la cámara un ángulo *(-d*).

25.6. Movimiento de la imagen

El arrastre de la imagen sobre la película se detecta como una pérdida de la nitidez en ésta. Al tomar fotografías y encontrarse la cámara en movimiento, será preciso regular el tiempo de exposición en combinación con la velocidad del avión para que el arrastre que se origine se

encuentre dentro de unos límites que se consideren tolerables, es decir, dentro del concepto de nitidez fotográfica. Las causas que pueden motivar el arrastre de la imagen son:

- Desplazamiento de la cámara en la dirección del vuelo.
- Vibraciones de la cámara transmitidas por el avión.
- Balanceo del avión.

El primer efecto es mucho mayor que los otros dos, los cuales con un buen montaje de la cámara sobre los sistemas de suspensión antivibrantes, buenas condiciones atmosféricas y un buen pilotaje, quedarán prácticamente anulados.

El desplazamiento se puede expresar en función de la velocidad del avión (Vg), el tiempo de obturación de la cámara (Δt) y la escala imagen (Mb) del siguiente modo:

$$\Delta s = Vg\ \Delta t\ Mb$$

Para una determinada escala de la imagen, el avión deberá tener una velocidad de crucero tal que, combinada con los tiempos de exposición de la cámara, de un valor tolerable de nitidez *($\leq$ 0.03mm)*.

25.7. Vuelo asistido con GPS y vuelo con sistema GPS/INS

Los sistemas electrónicos de navegación están basados en el conocimiento de las coordenadas del avión respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el planeamiento de vuelo. Dentro de estos sistemas destacan:

- ***GPS*** *(Global Position Syste*m): en la actualidad es uno de los sistemas más utilizado en la realización de vuelos fotogramétrico, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección (X0, Y0, Z0), permite la generación automática de los gráficos de vuelo.

- ***INS (Sistema de navegación inercial***): Basado también en el principio de *" volar desde*", este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas *X* e *Y* desde un punto de partida conocido.

Entre las aplicaciones del *GPS* destacan las dirigidas a obtener la posición de vehículos, barcos y aviones en movimiento conocida como *Posicionamiento GPS Cinemático.* En el posicionamiento de cámaras aéreas o sensores, las condiciones de operación son muy diferentes que en tierra, ya que están condicionadas a que el vuelo fotogramétrico sea operativo. Las condiciones restrictivas se deben a que el receptor del avión está continuamente en movimiento y en tierra se debe utilizar sólo un receptor, por razones de operatividad, y éste puede estar a cientos de kilómetros, además de que la duración del vuelo se puede prolongar durante horas.

Brevemente puede decirse que en vuelos fotogramétricos se puede emplear el *GPS* en los modos siguientes:

- En navegación y tiempo real sólo se necesita el código C/A y se puede realizar posicionamiento de 50 m para navegación..
- En navegación y tiempo real, si se reciben correcciones por radio mediante sistemas como el *OMNISTA*R, se pueden alcanzar precisiones menores a 2 m.
- Para la determinación de las coordenadas de la trayectoria del avión y finalmente las coordenadas de los centros de proyección, se necesita aplicar el método relativo, con un receptor en vuelo y una estación de base, medición de fase y post-proceso, pudiéndose alcanzar en condiciones operativas precisiones de varios centímetros.

Las características que debe tener un receptor para ser utilizado a bordo de un avión, con el fin de determinar los centros de proyección en método diferencial cinemático, son:

- Tener al menos un total de cinco canales, para captar de forma continua y simultánea a cinco o más satélites si están visibles.
- Poder realizar observaciones en fase y pseudodistancias.
- Es suficiente que las observaciones sean del tipo *L1* código *C/A* y fase *L*1.
- Realizar las observaciones en el momento de la toma de la fotografía o calcularse por interpolación menor de 0,2 segundos.

Para la determinación de las coordenadas de los centros de proyección se realizará un vuelo fotogramétrico con un receptor GPS instalado en el avión y otro estacionado en una base de referencia en tierra, que permita realizar el cálculo diferencial. El receptor de tierra no es

necesario que esté en la zona de vuelo. Con los últimos desarrollos en software, se establece una distancia máxima entre el receptor instalado en el avión y la base de referencia menor de aproximadamente 500 km.

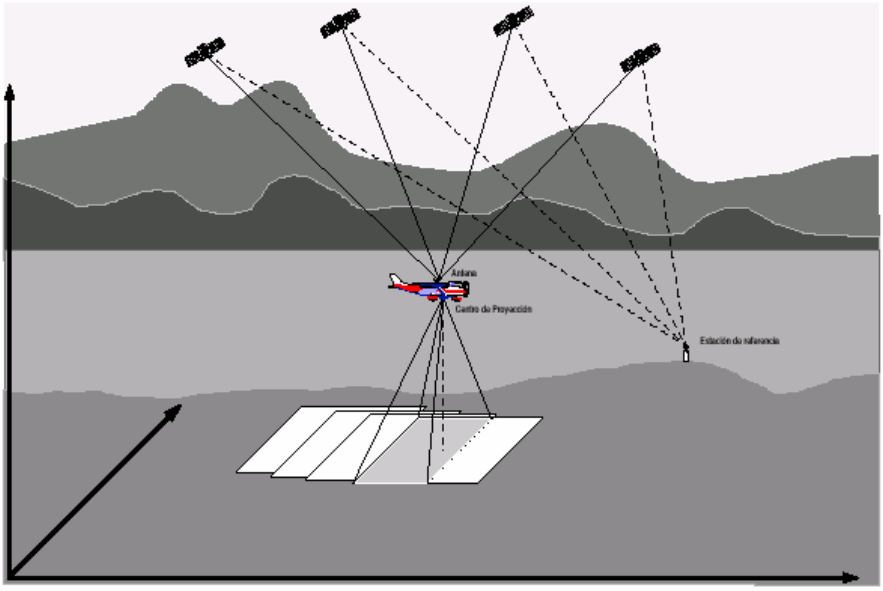


Figura 12.

El receptor *GPS* y la cámara funcionan independientemente. Para posicionamiento, las observaciones de los receptores *GPS* se hacen a intervalos de tiempo constantes *(0,5 a 1 segundo)* y las exposiciones de la cámara se realizan de forma independiente, teniendo éstas últimas que referirse al mismo sistema de tiempo en el que se tengan las posiciones de la antena del receptor *GPS* (se tiene que tener en realidad las relaciones entre estos tiempos para poder determinar uno en función de otro). De esta manera, en post-proceso por métodos diferenciales y combinando observaciones de vuelo y la estación base, se obtendría la trayectoria del avión con coordenadas cada 0,5 segundos. Las posiciones del centro perspectivo de la cámara se van a obtener posteriormente de la interpolación de los datos de la trayectoria del avión.

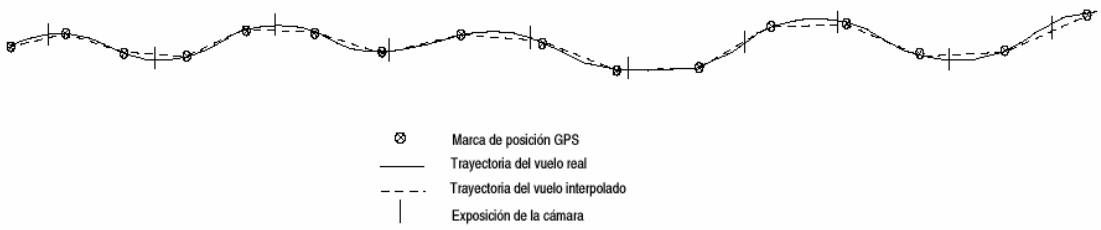


Figura 13. Interpolación entre datos GPS y exposición de la cámara

Para poder interpolar las posiciones de exposición de la cámara de las posiciones *GPS* de la trayectoria del avión, los momentos de exposición de la cámara y los momentos de observaciones de GPS se deberán unificar en una escala de tiempo similar. Con este fin, las cámaras modernas producen un impulso eléctrico justo en el momento en que la cámara realiza la exposición.

Cuando este impulso llega al receptor, éste lo procesa y libera un registro/grabación del tiempo de recepción. De esta manera los tiempos de exposición de la cámara y los de observación de *GPS* se producen en una misma escala de tiempo, por lo que las posiciones pueden ser interpoladas para los momentos de exposición de la cámara. El receptor *GPS* deberá tener un alto número de datos para que la posterior interpolaci6n de los disparos se realice con precisión, de manera que registren cada época para intervalos inferiores a 1 segundo.

Por lo que respecta a la relación cámara-antena han de tomarse todas las precauciones para garantizar la geometría del conjunto. En la siguiente figura se muestra la geometría de la cámara y la antena *GPS* montada en el fuselaje del avión. En esta figura *x, y, z* representan el sistema tridimensional de coordenadas de la cámara; y x_A, y_A, z_A representan las coordenadas de la antena del *GPS* relativamente respecto al sistema de la cámara. El eje *x* de la cámara es paralelo al eje longitudinal del avión, el eje *z* es vertical y el eje *y* es perpendicular a los ejes *x,* z. Las coordenadas *GPS* de la antena deben ser referidas a las lentes de la cámara. Para hacer esto es necesario conocer la orientación angular de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del espacio objeto.

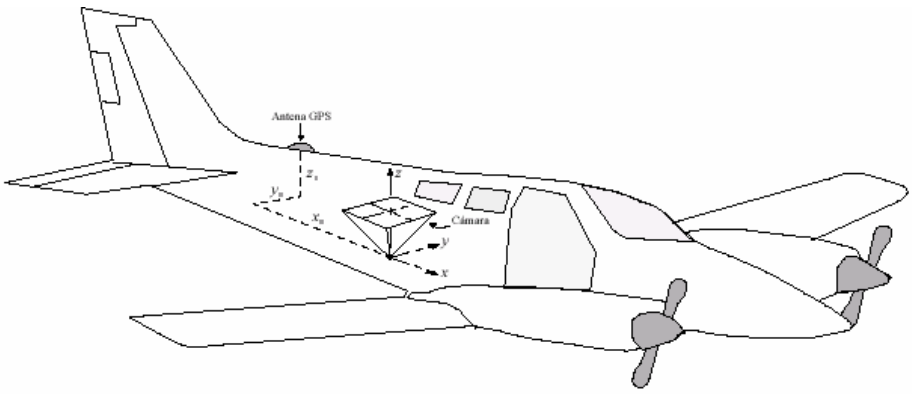


Figura 14. Configuración de la cámara y la antena GPS

Si la montura de la cámara es fija, los parámetros de la orientación angular de la cámara *(*ω , ϕ , κ *)* deben transmitirse directamente a la orientación angular del vector de la cámara a la antena.

Los diferenciales de rotación *(Δω , Δϕ, Δκ)* entre la cámara y el avión deben tenerse en cuenta para la determinación de la posición angular cámara-antena en el espacio objeto. Incluso en el caso de montura fija habrá generalmente un ajuste *(Δκ)* para garantizar la cobertura fotográfica propia. Algunas monturas de cámaras tienen la capacidad de medir los diferenciales de rotación y pueden ser almacenados en un ordenador.

Considerando cada diferencial de rotación de la cámara con respecto a la montura, cuando se mira del eje positivo hacia el origen, las ecuaciones de rotación cámara-antena con respecto al espacio objeto son:

$$\omega' = \omega - \Delta\omega$$
$$\varphi' = \varphi - \Delta\varphi$$
$$\kappa' = \kappa - \Delta\kappa$$

En estas ecuaciones, ω,ϕ,κ son los parámetros angulares de la orientación externa de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del espacio objeto; Δω, Δϕ, y Δκ son los diferenciales de rotación de la cámara con respecto a la montura, y ω' ϕ', κ' son las rotaciones del vector de la cámara a la antena con respecto al sistema del espacio objeto.

Determinaremos y tendremos la matriz M'. Las coordenadas de las lentes de la cámara las calcularemos con las expresiones siguientes:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} - R'^{T} \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}$$

donde X, Y, Z son las coordenadas del espacio objeto de los centros de cámara, X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS}, son las coordenadas del espacio objeto de la antena del GPS; R es la matriz de rotación y, x_A, y_A z_A son las componentes del vector cámara-antena.

Cuando una montura de cámara no ofrece la posibilidad de medir los diferenciales de rotación se consideran igual a 0, dando lugar a errores en el cálculo de la posición de las lentes de la cámara. Estos errores pueden minimizarse, montando la antena del GPS verticalmente sobre la cámara en el avión. La antena receptora deberá estar centrada sobre el centro de simetría de la cámara fotogramétrica, con unos pequeños desplazamientos (offset) que luego tendrán que ser

tenidos en cuenta en el proceso de cálculo, en función de la dirección de la pasada e inclinación de la cámara. Lo ideal sería combinar el *GPS* con un sistema de navegación inercial *(INS*).

Cuanto más pequeños son los diferenciales de rotación, más pequeños serán los vectores antena-cámara y por tanto los errores de posición de las lentes serán menores de 10 cm. Los valores de ω ,ϕ, y κ son necesarios para calcular la traslación, y la corrección offset de la antena se incluirá en el cálculo iterativo del ajuste analítico por haces.

Una vez finalizada la misión fotográfica, con registro de observaciones *GPS* en vuelo y en la estación de referencia, se realizará el cálculo, mediante software apropiado, de las baselíneas de la antena del receptor en el avión, mediante el método diferencial, determinando la trayectoria del avión en la misión fotográfica. A partir de las coordenadas de la antena *GPS* y su hora de registro y, relacionando estos datos con el momento en que se realizaron las exposiciones de la cámara, se interpolan las coordenadas de los momentos de disparo.

A continuación se puede realizar la transformación de estas coordenadas desde el sistema *WGS84* al sistema de la estación de referencia, generalmente *UT*M, mediante observación *GPS* de vértices de la Red Geodésica Nacional y así poder efectuar el cálculo de los parámetros de transformación.

Estas coordenadas *UT*M, o bien las *WGS84* de la antena y la posición de la antena respecto a la cámara si se conoce, serán una observación más junto con las coordenadas placa (método haces de rayos) y coordenadas de puntos de control para el ajuste combinado de la triangulación aérea.

Este método sólo será efectivo si no se le imponen unas condiciones restrictivas de vuelo, lo cual tendría gran influencia en los costes económicos.

El posicionamiento cinemático relativo de una cámara en un avión está afectado por algunos problemas específicos que resumimos a continuación:

- *Desplazamiento cámara-antena GPS.* El posicionamiento del *GPS* está referido a la antena instalada en la parte alta del avión y, finalmente habrá que reducirse al centro de perspectiva de la cámara en vuelo. El desplazamiento (offset) se define con los elementos Δx, Δy, Δz, que se tienen que medir directamente con el avión en tierra y, más tarde, hay que transformarlos en el sistema objeto de coordenadas. Para ello, la orientación del avión (cámara) tiene que saberse aproximadamente, bien sea midiendo

las inclinaciones directamente o bien obteniéndolas después de un cálculo preliminar por aerotriangulación.

- *Flujo de datos.* La toma de datos con una alta frecuencia, necesaria para garantizar coordenadas por interpolación fiables para el momento de exposición de la cámara, implica un volumen considerable de datos a grabar a bordo y en el receptor fijo. Esto es inusual en los métodos geodésicos. Durante una misión aérea de fotografía el grabador GPS de datos y almacenamiento puede acumular hasta 20 o más Mbytes de datos.

- *Fase inicial de ambigüedad.* Para el cálculo diferencial es necesario resolver el problema de la fase inicial de ambigüedad, que tiene que estar solucionado antes de iniciar el posicionamiento cinemático. Un método muy práctico consiste en partir de unas ambigüedades aproximadas, de manera que cada pasada, o parte de pasada, en que no se produzca pérdida de ciclos sea calculada en un sistema propio o, lo que es lo mismo, con un desplazamiento uniforme respecto al sistema general. El problema aparece retardado en el proceso de cálculo de la aerotriangulación. Entonces se tendrán que determinar estos desplazamientos *(shift)* y corregirlos.

- *Sistema de coordenadas de referencia, problema de datum.* El posicionamiento del *GPS* se realiza en el sistema de coordenadas WGS 84. Si todos los puntos de control y todas las posiciones de *GPS* de la cámara están determinadas en ese sistema, todos los resultados estarán en este mismo sistema de coordenadas.

  Como generalmente se necesitan las coordenadas en el sistema geodésico nacional, la forma más fácil para realizar la transformación es partir de las coordenadas de vértices en los dos sistemas calcular una transformación espacial entre los dos sistemas o bien incluir dichas coordenadas en el ajuste combinado del bloque (aerotriangulación). Esta solución es buena planimétrica, pero altimétricamente sería necesario disponer de datos del geoide, de un geoide local o al menos de una aproximación del mismo.

- *Fallos de pérdida de ciclos, discontinuidades.* Las observaciones por medio del método de medida de fase tienen que ser continuas durante el vuelo (incluyendo las grabaciones fijas de antes de despegar y después de tomar tierra). Estas son las condiciones necesarias para poder calcular la trayectoria del vuelo.

  Desgraciadamente existen distintos tipos de interrupciones con las que hay que tratar:

- *Interrupción de señales:* La señal del satélite puede quedar interrumpida por diversas causas. Un ejemplo puede ser un giro de 180º con un gran ángulo de inclinación, lo que implica una sombra debida a las alas del avión.
- *Fallos cíclicos*: Puede pasar a veces, sin causa aparente, durante la fase de observación, que la cuenta del ciclo total puede haber resbalado en el receptor entre unos pocos a unos miles de ciclos, aunque no se detecte a simple vista en la fase de observaciones. Los resultados de estos fallos en el ciclo son saltos en la trayectoria. Los fallos de ciclos son un problema del diseño del receptor y también pueden ser producidos por múltiples efectos de trayectoria o por discontinuidades en la ionosfera.
- *Cambios en las Constelaciones:* Durante los periodos de observación de varias horas, los satélites pueden desaparecer del horizonte, así como aparecer otros nuevos. Por lo tanto, el número y la constelación de los satélites visibles está cambiando. Normalmente, muchos de estos cambios suelen ocurrir durante el vuelo.

Bibliografía

[1] Pérez Álvarez, Juan Antonio, Apuntes de Fotogrametría III. 2001. Centro Universitario de Mérida, Ingeniería Técnica Topografía (Universidad de Extremadura)

[2] Clavo, Domingo. Fotogrametría II, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Topografía (Universidad Politécnica de Madrid)

Tema 26. El modelo geométrico en fotogrametría: Modelo geométrico básico. Sistema de referencia imagen. Alteraciones en la métrica de la imagen: factores físicos, influencia de la cámara métrica, del avión y de la película. Calibrado de cámaras métricas analógicas. Correcciones a las foto-coordenadas.

26.1. Modelo geométrico básico

Cuando se obtiene una fotografía de un objeto disponemos idealmente de una representación o imagen perspectiva del mismo. El punto de vista de esta perspectiva es el centro óptico del objetivo de la cámara fotográfica y el plano en el cual registramos su imagen viene materializado por el plano que define la emulsión fotográfica.

Consideremos una fotografía aérea tomada a una altura que todo punto objeto se forme en el plano focal del objetivo.

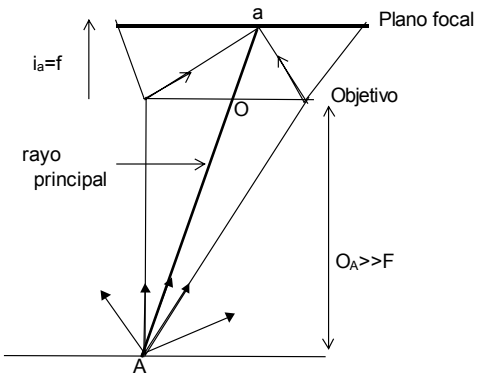


Figura 1.

De forma esquemática podemos entonces "reemplazar" el objetivo por un punto (centro óptico) y cada haz de rayos asociado a los puntos objeto por su rayo principal, de esta forma la figura se reduce a una proyección central estricta (o perspectiva). El punto principal es el punto de intersección del plano focal con el eje óptico.

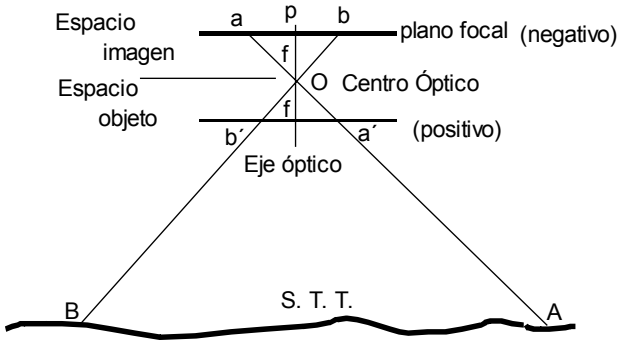


Figura 2.

El reconocimiento de este modelo geométrico permite la adecuada utilización analítica del producto fotográfico para el estudio de las propiedades métricas del objeto fotografiado.
En la realidad se puede afirmar sin embargo, que un objetivo fotográfico no da una perspectiva geométrica ideal de un objeto, y esto se debe principalmente a dos razones:

- Existencia de dos centros de proyección.
- Existencia de distorsiones.

Con respecto al primer punto, lo dicho es válido cuando los índices de refracción del espacio objeto e imagen coinciden, al igual que los puntos principales del sistema óptico que constituye el objetivo de la cámara.
El objetivo de una cámara aérea puede tener hasta doce elementos dióptricos diferentes, la consideración de los Puntos nodales es fundamental para el establecimiento del modelo geométrico.

Así pues, en las condiciones expuestas el modelo geométrico que tenemos en realidad es el de la siguiente figura que no responde a lo que entendemos por proyección central estricta pues más bien podemos decir que existen dos centros de proyección, uno exterior (punto nodal anterior) en el cual convergen los rayos principales asociados a cada uno de los infinitos puntos objeto, y otro interior desde el que los rayos se proyectan sobre el plano focal imagen.

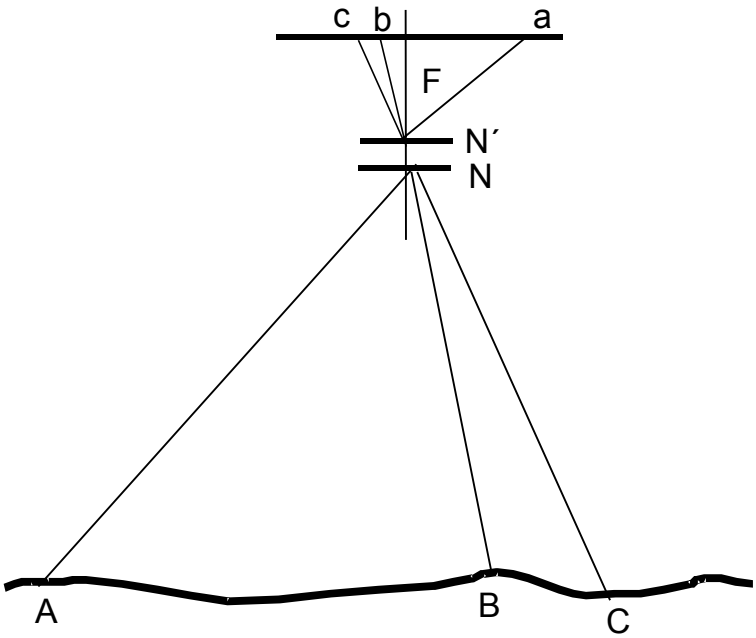


Figura 3.

El segundo factor es la distorsión que es simplemente la incapacidad del objetivo de enfocar una imagen en su posición teóricamente correcta en el plano focal.

Como la geometría del negativo es idéntica a la de la fotografía en todos los aspectos, y esta puede considerarse el resultado de una proyección perspectiva del objeto donde el centro perspectivo es el punto nodal anterior con el plano de la representación a una distancia f de este punto en el espacio imagen**.**

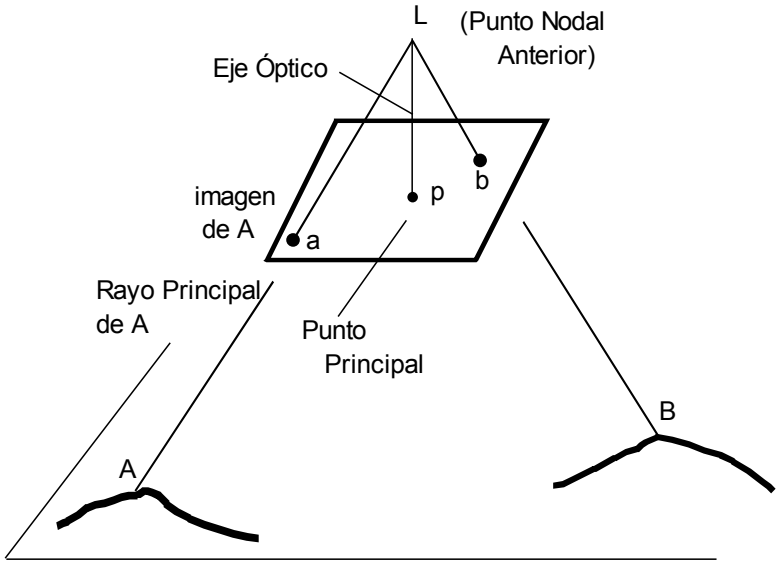


Figura 4.

26.2. Sistema de referencia imagen

Las marcas fiduciales tienen un papel fundamental en todo proceso fotogramétrico analítico, ya que las líneas que unen marcas fiduciales opuestas se intersecan en un punto denominado centro de colimación y las cámaras aéreas se fabrican de tal forma que este punto coincida o este muy próximo al punto principal.

El sistema de referencia que se adopta usualmente para definir coordenadas fotográficas es un sistema de ejes cartesianos materializado por las rectas que unen marcas fiduciales opuestas tal y como se indica en la figura.

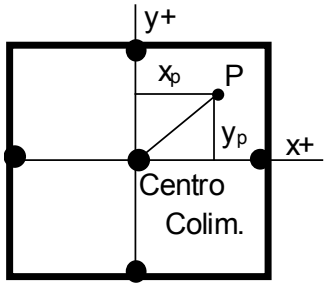


Figura 5.

En fotogrametría aérea, el eje x se elige como la línea fiducial que define con mayor aproximación la dirección del vuelo, positivo en esta dirección; el eje y es la otra línea orientado de tal forma que resulte un sistema directo. En este sistema a las coordenadas (x, y) de los puntos imagen las denominaremos foto-coordenadas. En desarrollos analíticos se utiliza con frecuencia un sistema de referencia 3D asociado a la fotografía y que definimos de la siguiente manera:

1. Origen en el punto L
2. Ejes x, y paralelos a los ejes fiduciales
3. Eje z en la dirección del eje óptico

A este sistema lo denominaremos sistema de referencia imagen o instrumental. Un punto imagen de foto-coordenadas (x, y), tiene por coordenadas en este sistema de referencia:

$$x' = x - x_0$$
$$y' = y - y_0$$
$$z' = -f$$

donde f es la focal y (x_0, y_0) las coordenadas del punto principal en el sistema de ejes fiduciales.

26.3. Alteraciones en la métrica de la imagen: factores físicos, influencia de la cámara métrica, del avión y de la película

Se van a ver las " deformaciones " de la imagen, entendiendo por deformación el conjunto de efectos que alteran la posición de los puntos imagen respecto a los que le son asignados por las leyes de la perspectiva. Esta alteración de la posición causará errores en la reconstrucción de los haces por lo que interesa estudiar sus causas, conocer su magnitud y en su caso, aprender a eliminarlos**.**

26. 3.1 Factores físicos

Esfericidad terrestre

En realidad no puede decirse que la curvatura terrestre produce una deformación en la imagen. Esto tiene sentido cuando, a través de la fotogrametría, se busca una representación plana de la superficie terrestre.

Esta "distorsión" es pues, función del tipo de representación adoptado.

Puede suponerse en general:

Geoide esférico y representación confundida con la proyección ortogonal sobre el plano tangente en N. En estas condiciones, el rayo LM debería ser reconstruido en LM_1, resultando una distorsión caracterizada por $\Delta\alpha$ y Δr.

En estas condiciones, con las cámaras métricas siempre puede suponerse que $\Delta\alpha = \Delta\alpha'$

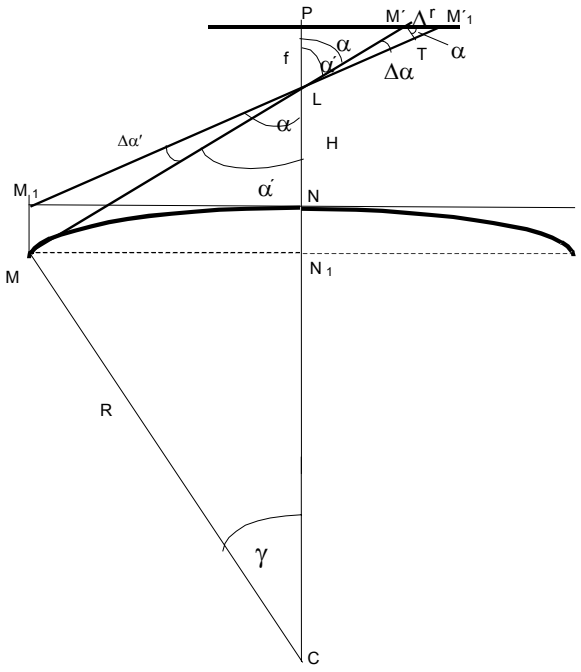


Figura 6.

En el triángulo $M´M_1´T$ se verifica:

$$\cos\alpha = \frac{M'T}{\Delta r} \Rightarrow \Delta r = \frac{M'T}{\cos\alpha} = \frac{LM'}{\cos\alpha}\Lambda\alpha$$

Y en el triángulo PLM´ tenemos que:

$$\cos\alpha = \frac{f}{LM'} \Rightarrow LM' = \frac{f}{\cos\alpha}$$

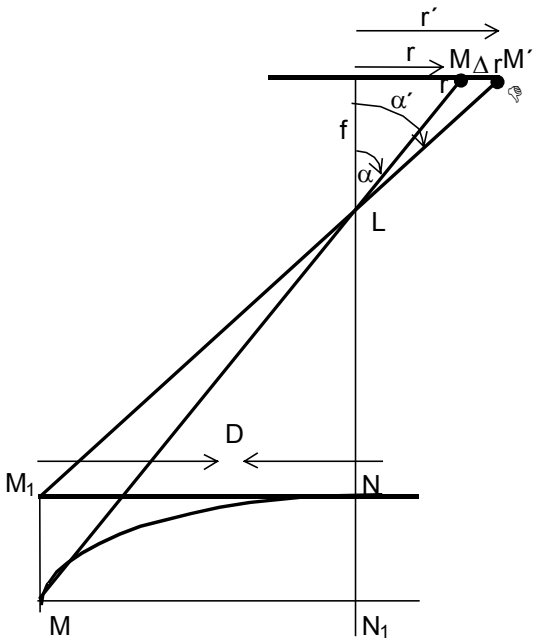
Sustituyendo queda:

$$\Delta r = \frac{LM'}{\cos\alpha}\Delta\alpha = \frac{f}{\cos^2\alpha}\Delta\alpha$$

que no tiene utilidad al no conocerse el valor de $\Delta\alpha$. De la figura anterior se deduce:

$$MN = R\gamma = D$$
$$MN_1 = R\,\mathrm{sen}\,\gamma \cong R\gamma = D$$
$$N_1C = R\cos\gamma \cong R(1-\frac{\gamma^2}{2}) = R(1-\frac{D^2}{2R^2}) = R-\frac{D^2}{2R}$$
$$NN_1 = R - N_1C = \frac{D^2}{2R}$$

En la siguiente figura, se verifica:



$$\frac{r}{D} = \frac{f}{H+\frac{D^2}{2R}} \Rightarrow r = \frac{Df}{H+\frac{D^2}{2R}}$$

$$r' = \frac{f}{H}D$$

Figura 7.

De ambas expresiones, queda**:**

$$\Delta r = r'-r = \frac{f}{H}D - \frac{f}{H}D(1-\frac{D^2}{2RH}) = \frac{fD^3}{2RH^2} = \frac{H}{2Rf^2}r^3$$

Puede decirse que la esfericidad terrestre acerca los puntos radialmente, es decir, se trata de una "Distorsión" negativa.

Es tanto más importante cuanto mas se aproxima a los bordes (r3)

Es simétrico el fenómeno radialmente.

Crece con la reducción de focal.

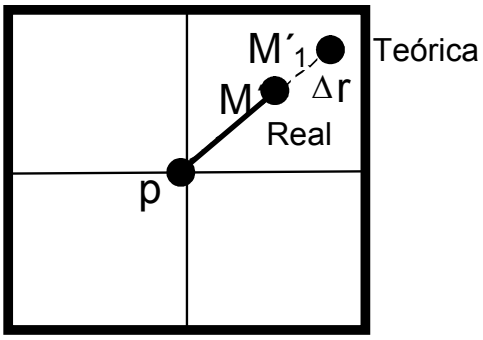


Figura 8.

Refracción atmosférica

La refracción atmosférica es el resultado de variaciones de la densidad de la atmósfera con la altitud, lo que da lugar a que esta no sea un medio homogéneo y tenga un índice de refracción variable.

Aún en el modelo más sencillo, es decir el índice de refracción es función solo de la distancia radial (modelo esférico de atmósfera), esta circunstancia ocasiona que los rayos luminosos no sean líneas rectas sino curvas planas, según la hipótesis anterior, con la concavidad dirigida hacia la región de mayor índice de refracción (capas más bajas).

Según estas consideraciones, en la siguiente figura se puede ver el efecto de la refracción atmosférica en el proceso de formación de imágenes fotográficas, donde a es la imagen real del punto objeto A y a' su imagen teórica según una proyección central estricta (es decir, en condiciones de homogeneidad).

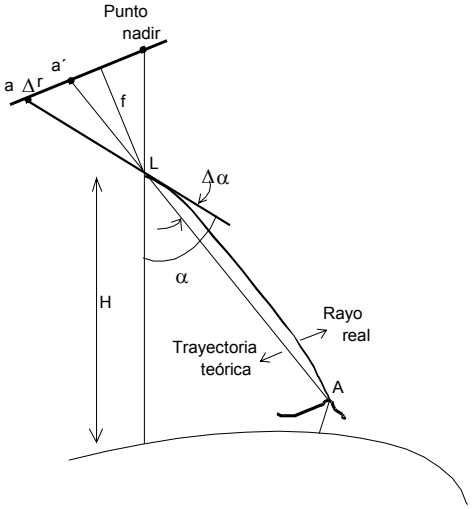


Figura 9.

El ángulo $\Delta\alpha$, entre la trayectoria teórica y la tangente a la trayectoria real en el punto L, depende de varios parámetros como la altura de vuelo, la altitud del punto A, la dirección del rayo luminoso y las condiciones atmosféricas a lo largo de su recorrido. En cualquier caso, el efecto final de la refracción atmosférica es un desplazamiento radial de las imágenes desde el punto nadir de fotografía.

En su forma más simple, el ángulo $\Delta\alpha$ se supone proporcional a la tangente de α, es decir:

$$\Delta\alpha = K \text{ tg } \alpha$$

Donde la constante K es función de los factores mencionados anteriormente. Así por ejemplo, en condiciones atmosféricas estándar esta constante puede calcularse a partir de las ecuaciones:

$$K = (T / \rho) - [(Q_0 - Q_A) / (H_0 - H_A)]$$

donde $\rho = 636620$ y T, Q_0 y Q_A son funciones polinómicas de H_0 y H_A.

En estas fórmulas H_0 y H_A son la altura de vuelo y la altitud del punto A sobre el nivel del mar, respectivamente.

Para finalizar, consideremos el caso de una fotografía estrictamente vertical. En este caso, el punto principal coincide con el punto nadir y, en primer orden de aproximación, la relación entre Δr y $\Delta\alpha$ viene dada por la ecuación:

$$\Delta r = \Lambda\alpha(\frac{r^2 + f^2}{f})$$

de modo que introduciendo la constante K tenemos:

$$\Delta r = (\frac{r^2 + f^2}{f})ktag\alpha = (\frac{r^2 + f^2}{f})k\frac{r}{f} = kr(\frac{r^2 + f^2}{f^2})$$

Vamos a ver la demostración de la expresión inicial

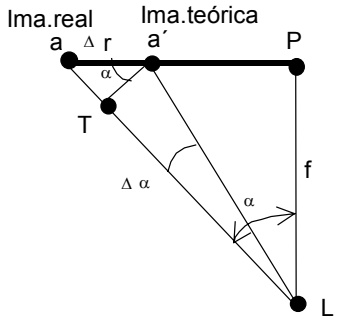


Figura 10.

En la figura, tenemos que:

$$\Delta r = r' - r = P_{a'} - P_a$$

$$\Delta r = \frac{Ta'}{\cos\alpha} = \frac{La'}{\cos\alpha}\Delta\alpha \cong \frac{f/\cos\alpha}{\cos\alpha}\Delta\alpha = \frac{f}{\cos^2\alpha}\Delta\alpha = f(1+tag^2\alpha)\Delta\alpha = f(1+\frac{r^2}{f^2})\Delta\alpha = \Delta\alpha(\frac{f^2+r^2}{f})$$

La refracción aleja los puntos de sus posiciones teóricas estamos ante una distorsión positiva, es decir, contraria a la esfericidad.

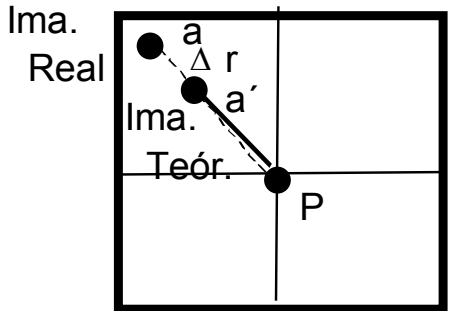


Figura 11.

El estudio riguroso se hace en los siguientes pasos:

Determinación de la expresión del ángulo en un punto cualquiera del rayo.

Emplear una cierta distribución de índices.

Obtener la ecuación diferencial de la curva trayectoria del rayo.

Integración de la ecuación diferencial

Efecto conjunto esfericidad - refracción

Como en Topografía y Geodesia, las dos causas operan conjuntamente y en sentido contrario (la refracción tiende a disminuir la esfericidad) aunque el efecto de esfericidad es 4 - 5 veces el de refracción.

Tenemos:

$$\Delta r = \Delta r \text{ esf.} - \Delta r \text{ ref.}$$

Este estudio no da más que un orden de magnitud de los fenómenos dados las hipótesis (atmósfera en equilibrio obedeciendo a las leyes Standard de la aeronáutica, aire como gas perfecto). El desconocimiento de la refracción atmosférica es una de las limitaciones de la precisión de las medidas fotogramétricas.

26. 3.2 Influencia de la cámara métrica

La óptica

La imagen de un punto objeto no es un punto sino un círculo, incluso en el plano de óptimo enfoque. Estas imperfecciones de la imagen se denominan aberraciones y considerando 1uz monocromática se clasifican en aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión.

Mientras que las primeras aberraciones tienen que ver con la calidad de la imagen y su efecto conjunto será perturbador en fotogrametría solo si el deterioro de las imágenes impide la identificación de detalles de interés o aumenta la incertidumbre en las medidas, la distorsión esta relacionada con la posición de la imagen en el plano imagen y no con la calidad de esta.

La distorsión es el desplazamiento del punto imagen con respecto de su posición ideal. En un sistema óptico centrado y con simetría de rotación este desplazamiento es radial y, por consiguiente, su medida es siempre lateral.

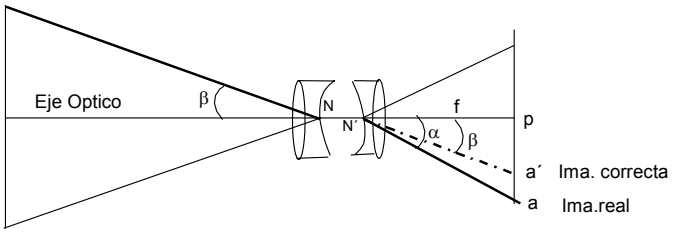


Figura 12.

Como $\beta \neq \alpha$, se verifica que: $a'a = \Delta r = Pa - Pa' = r - f\ tg\beta$

Por otra parte, esta distorsión radial introduce variaciones en la escala de la fotografía en función de la posición en el plano imagen.

En los sistemas ópticos precisos puede también ocurrir que los centros de curvatura de las superficies ópticas no sean colineales. Este error de centrado introduce otro tipo de distorsión denominada distorsión por descentramiento con una componente radial y otra tangencial, cuya magnitud en ambos casos es función no solo de la inclinación sino también de la orientación.

En presencia de distorsión radial, la posición real de un punto imagen difiere de su posición teórica en la cantidad:

$$\Delta r(\alpha) = r(\alpha) - f\ tg\alpha$$

donde r es la distancia de la imagen al punto principal y α el ángulo de inclinación del rayo principal en el espacio objeto.

En función de lo anterior, tenemos que el cálculo de la distorsión radial depende del valor que adoptemos para la distancia focal f, razón por la que definimos:

Distancia focal equivalente (DFE) a la calculada según la fórmula basada en la teoría gaussiana:

$$f_e = \frac{1}{n}\sum \frac{r_{\alpha i}}{tag\alpha}$$

donde $r_{\alpha i}$ es la distancia de la imagen del "colimador i" al punto principal y n el número de colimadores a una distancia angular α del eje óptico (normalmente, n = 4 y α =7º.5). En la figura siguiente puede verse una típica curva de distorsión basada en la DFE y calculada a partir de:

$$\Delta r(\alpha) = r(\alpha) - f\text{tg}\alpha$$

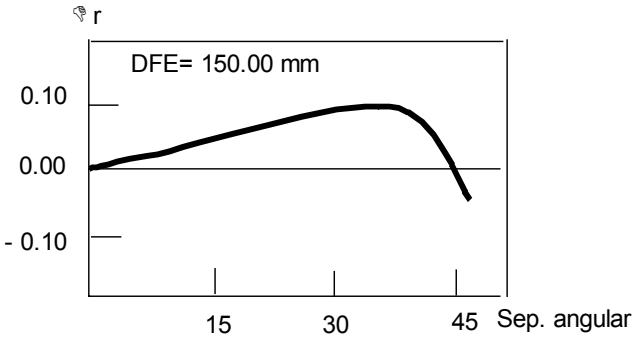


Figura 13.

El valor de f es una propiedad del sistema óptico, pero también podemos considerarla como un coeficiente matemático que puede ser modificado si con esto se logra un mejor ajuste entre la imagen y su ideal geométrico.

Para lo cual se obtiene una nueva focal que se denomina distancia focal calibrada (DFC) y la forma de obtenerla es obligar a que en la nueva curva de distorsión se verifique:

$$\Delta r_c(\alpha_{máx}) = -\Delta r_c(\alpha_{mín})$$

con $\alpha_{máx}$ y $\alpha_{mín}$ los ángulos en los cuales la distorsión radial promedio, calculada con la DFE, alcanza su valor máximo (positivo) y su valor mínimo (negativo) respectivamente.

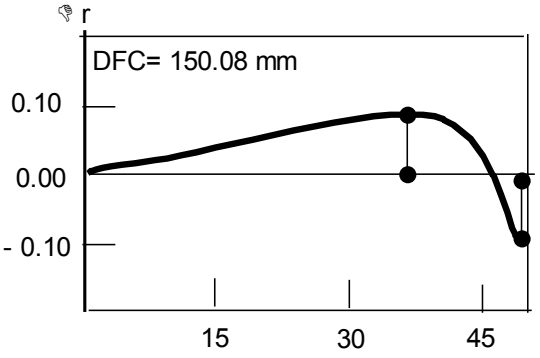


Figura 14.

Un sencillo cálculo demuestra entonces que la diferencia Δf entre la DFC y la DFE viene dada por:

$$\Delta f = (\Delta r_{máx} + \Delta r_{mín})/(tg\alpha_{máx} + tg\alpha_{mín})$$

Demostración:

$$\Delta f = f_c - f_e = \frac{\Delta r_{\max} + \Delta r_{\min}}{tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}} \Rightarrow \Delta r_{\max} + \Delta r_{\min} = f_c(tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}) - f_e(tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}) \Rightarrow$$

$$r_{\max} - f_e tag\alpha_{\max} + r_{\min} - f_e tag\alpha_{\min} = f_c(tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}) - f_e(tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}) \Rightarrow$$

$$r_{\max} + r_{\min} = f_c(tag\alpha_{\max} + tag\alpha_{\min}) \Rightarrow r_{\max} - f_c tag\alpha_{\max} = -(r_{\min} - f_c tag\alpha_{\min}) \Rightarrow \Delta r_{\max} = -\Delta r_{\min} \Rightarrow$$

$$[\Delta r_{\max}] = [\Delta r_{\min}]$$

En realidad la función de distorsión se conoce en un número discreto de puntos α_i; con objeto de predecir la distorsión de cualquier punto imagen de la fotografía, se supone normalmente un comportamiento polinomial para Δr_c en potencias impares de r del tipo:

$$\Delta r_c = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7$$

Los coeficientes k_i pueden estimarse mediante un ajuste de mínimos cuadrados en base a las distorsiones radiales medidas a diferentes distancias del punto principal.
Debemos insistir en que la "calibración"no implica cambio físico en el sistema óptico.

<u>El filtro</u>

El efecto de desplazamiento paralelo del rayo al pasar por la lámina plano-paralela es despreciable en fotogrametría aérea. Pero el filtro puede presentar deformaciones en las caras planas y defectos de paralelismo entre ellas. Esto produciría distorsiones tangenciales y disimetrías en la distorsión radial que se añadirían a las de la cámara, por lo que los filtros deben controlarse antes de su empleo.

<u>La mecánica</u>

Las influencias proceden de:

- Un montaje defectuoso del objetivo en la cámara
- Defectos de coincidencia del eje óptico y el eje mecánico
- Defecto de ortogonalidad del plano de la emulsión y del eje óptico.

Todo esto produce disimetrías en la ley distribución de la distorsión.

No es fácil separar los defectos ópticos y los mecánicos y lo que importa es el resultado global que se obtiene en el proceso de calibrado. Lo fundamental es la no presencia de disimetrías en la distorsión radial.

26. 3.3 Influencias del avión y de la película

En realidad, mas que la influencia del avión, lo que interviene son los desplazamientos que puede haber en la toma de fotos durante el vuelo.

El obturador

Solo se usan los obturadores centrales a pesar de sus inconvenientes como son:
Riesgo de desplazamiento de imagen para grandes escalas.
Rendimiento no muy elevado, al no ser los de menor tiempo de exposición
Dificultades de construcción y colocación.

Variaciones de temperatura

La altura de vuelo suele ser grande, las cámaras métricas están sometidas a variaciones de temperatura importantes.

Si el avión no está presurizado no es raro encontrar diferencias de temperatura de 50º entre el suelo y el punto de vista. Si lo está, hay que tener en cuenta el vidrio que separa el objetivo del aire exterior, que también tendrá diferencias de temperatura.

El efecto es como si para una variación de temperatura se produjese una diferencia de focal:

$$f = f(\delta_1 - \delta_2)\,\Delta t$$

siendo δ_1 el coeficiente de dilatación del cuerpo de cámara y δ_2 el coeficiente de dilatación del soporte de emulsión.

Según esta fórmula, hay que esperar variaciones en la focal del orden de 0,01 mm.

La temperatura modifica también:

- Curvatura de las lentes.
- Índices de refracción.
- Posición relativa de las lentes, etc.

Influencia de la película

La estabilidad dimensional en las placas de vidrio era perfecta ya que las deformaciones son isótropas y muy débiles con lo que las deformaciones resultantes son despreciables, pero dado que son simétricas y medibles, pueden tenerse en cuenta.

Las películas, en cambio, sufren en el tiempo que sigue a su revelado, contracciones importantes y lo que es peor, anisótropas siendo mayor la deformación en el sentido del estirado de fabricación que en el transversal, e irregulares por lo que las distorsiones que producen son difíciles de tener en cuenta. Para medir estas deformaciones, algunas cámaras van provistas de una cuadrícula, así puede obtenerse una idea más correcta de la deformación en un punto cualquiera de la placa.

Planeidad

Es más importante la consistencia de la forma que la planeidad perfecta, pero esta debe asegurarse con error menor de 0,02 a 0,03 mm.

Las placas de vidrio no presentan problemas, pero la película por carecer de forma geométrica propia se debe asegurar su planeidad en la toma. Un defecto de planeidad provoca un desenfoque en la imagen.

Influencias diversas

Efecto Eberhardt o efecto de borde: es debido a un agotamiento rápido del revelador en contacto con una zona muy iluminada y en cambio, una frescura relativa de aquel en contacto con una zona próxima de baja iluminación. Puede producir un desplazamiento geométrico de los límites de dichas zonas.

Hay efectos, no muy bien conocidos, como son los posibles deslizamientos generales o locales de la gelatina sobre el soporte, debidos al tratar la película.

Conclusiones

1. Hay causas eliminables o reducidas a despreciables por el empleo de materiales convenientes (filtros, control de soportes, etc.).
2. Hay causas inevitables (distorsión radial, esfericidad) a veces, además, mal conocidas (refracción atmosférica, temperatura) pero que distorsiones simétricas y sistemáticas. Pueden corregirse y dejan residuos de pocas micras.
3. Hay causas irregulares y disimétricas (la distorsión tangencial, defectos mecánicos de cámaras, defectos de los soportes). Son las influencias mas graves, pues no son

cómodas de controlar ni de medir. Uno de los objetos del calibrado es ponerlas en evidencia.

26. 4. Calibrado de cámaras métricas analógicas

La calibración consiste en obtener:

- Distancia focal equivalente (DFE) y calibrada (DFC) del objetivo de la cámara.
- Parámetros de distorsión radial y distorsión por descentramiento.
- Coordenadas (x, y) del punto principal y punto principal de simetría.
- Coordenadas de las marcas fiduciales o distancia entre marcas fiduciales opuestas.
- Angulo de intersección entre las líneas fiduciales.
- Aplanamiento del plano focal.
- Resolución del objetivo.

Estas operaciones han de hacerse periódicamente.
La mayoría de los procesos de calibrado se hacen en laboratorio y por el propio fabricante.
Otros procesos se hacen en campo fotografiando desde el suelo o desde el aire un conjunto de señales materializadas en el terreno y cuyas posiciones relativas son conocidas con la suficiente precisión.
Hay otros métodos llamados estelares en los que se fotografían campos de estrellas identificables, que hacen el papel de las señales del método anterior.

Calibración por multicolimador

Es un método de calibración en laboratorio y consiste en un conjunto de colimadores fijos, situados unos respecto de los otros, en posiciones angulares precisas y perfectamente conocidas.
El retículo de cada colimador contiene en su plano focal una pequeña cruz acompañada de un patrón de investigación del poder separador.
Antes de colocar la cámara se alinean el telescopio y el colimador central, y se sitúa después la cámara con el obturador abierto y el almacén retirado, moviéndose verticalmente a lo largo de su eje a fin de hacer coincidir la pupila de entrada con el punto de convergencia de los colimadores.
Se coloca el plano focal con una diagonal en el plano de los colimadores, la imagen g del colimador central se producirá cerca del punto principal y de la intersección de las líneas fiduciales. Las demás imágenes a..., m (ver figura 15) se formarán a lo largo de una diagonal y en un plano perpendicular a este, en n.....y.

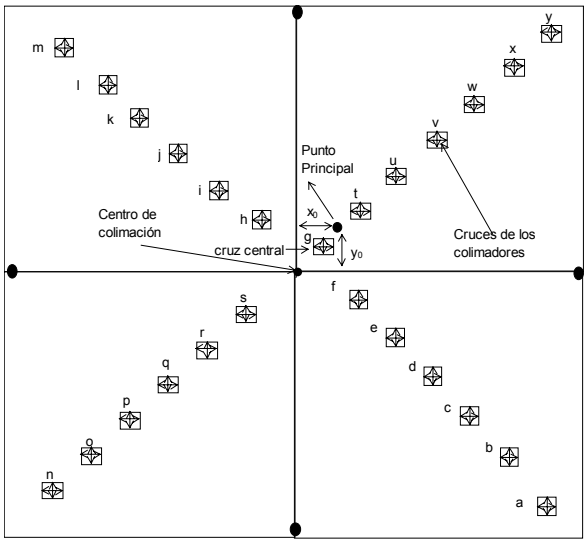


Figura 15.

Se obtiene una exposición sobre material estable de esta distribución y en un comparador se miden las distancias gf, gh,... gm, ga, etc. Así se calcula la distancia focal equivalente (DFE), para esta región limitada por las cuatro cruces más próximas al centro, que será la de menor distorsión.

$$DFE = f_e = (gf + gh + gs + gt) / 4tag\theta$$

Se calculan con este valor de f_e, los valores ge, gi, gr, gu = f_e tg2θ , luego se miden estas mismas distancias y se promedian. La distorsión en 2θ es:

$$\text{Distancia calculada} - \text{Distancia medida} = D_{2\theta}$$

Así se procede con todas las demás y se dibuja una "curva de distorsión".

Calculada la DFE se obtiene la distancia focal calibrada (DFC) que es aquella que produciría la distribución más uniforme de la distorsión en todo el formato, es decir, la que iguala el máximo y el mínimo de distorsión.

Es a esta DFC a la que nos referiremos siempre y que en general conocemos por f y a la que se denomina distancia focal, constante de la cámara, distancia principal o simplemente focal.

La imagen de la cruz del colimador central es el punto principal de auto colimación o "cruz central". Se mide su posición respecto al centro fiducial.

El punto principal teórico (pie de la perpendicular trazada desde el centro de la pupila de salida) debería coincidir con el punto principal de auto colimación. Las curvas de distorsión de cada sección serían simétricas alrededor de este punto principal de auto colimación.

Si esto no ocurre, es decir, no se obtienen curvas simétricas, se busca el punto que cumpla mejor esta simetría. Este es el punto principal de simetría cuya posición respecto al Centro fiducial también se calcula.

Conociendo, por otra parte, las separaciones de cada colimador del plano teórico que los contiene a todos, podrían calcularse las separaciones tangenciales de las imágenes de las cruces en la diagonal. Así comparando las distancias medidas y calculadas se obtiene la distorsión tangencial.

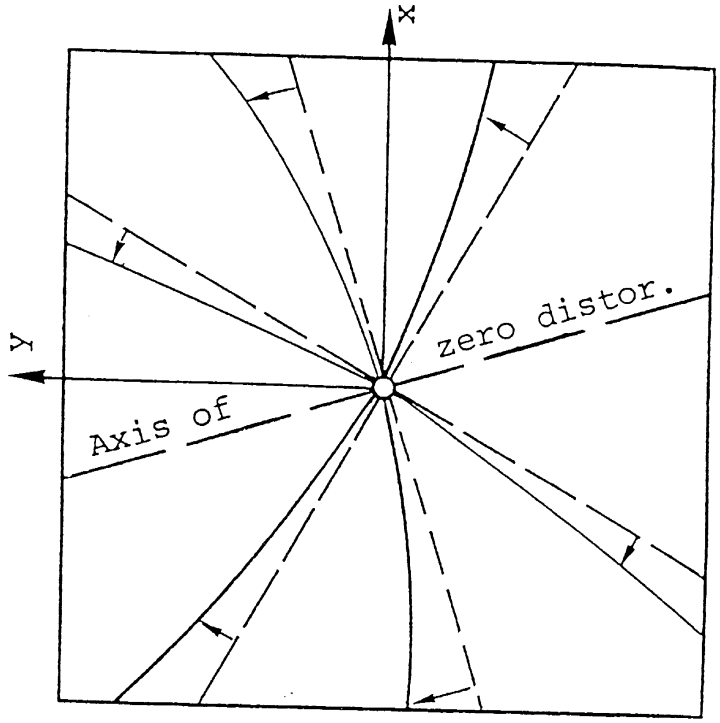


Figura 16.

El poder separador para diferentes ángulos de campo se establece por el análisis de las imágenes de los patrones de resolución proyectados por los colimadores acompañando a las cruces.

Autocalibración

Consiste en la toma de fotos en un área de test o polígono experimental, en el que se disponen de una serie de puntos pre-señalizados y cuyas coordenadas se conocen con gran precisión. Cuando el fin es un levantamiento fotogramétrico (ajuste por haces con parámetros adicionales),

la toma de fotos en el área de test se debe hacer antes y después del propio vuelo fotogramétrico, siendo las principales desventajas de esta técnica el que se necesite tener un área de test cerca de la zona a volar y que implica también el hacer vuelos adicionales en el área de test, uno antes de la zona a volar y el otro posterior a dicho vuelo.

Por medio de este procedimiento se recurre a la calibración de la cámara métrica durante el cálculo, siendo además el método más riguroso y preciso de ajuste por haces. Normalmente la corrección de todos los errores se hace ampliando, con nuevas incógnitas, el modelo matemático utilizado habitualmente en el ajuste por haces y cuya ampliación, conocida como método de ajuste con parámetros adicionales, corrige los elementos de la orientación interna de la cámara, los posibles errores sistemáticos debidos a la cámara, factores atmosféricos, otras causas de error debidas al vuelo y los errores de medida.

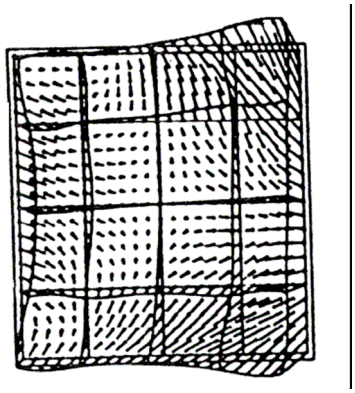


Figura 17.

En la figura se aprecian los errores sistemáticos de la imagen y que corresponden a las diferencias entre el modelo geométrico de la fotogrametría que es el correspondiente a una proyección central y la geometría real de la imagen, de esta manera al introducir valores iniciales de los parámetros se de orientación interna se pueden compensar los errores residuales debidos a la distorsión y deformación del fotograma.

Cuando se trabaja con cámara no métrica su consideración es fundamental para conseguir resultados con precisión, ya que es típico en estas cámaras que el centro de proyección teórico se deforma significativamente por la distorsión de las lentes y de la película y estas deformaciones pueden ser tenidas en cuenta en el ajuste con parámetros adicionales.
Las correcciones hechas a priori sobre las deformaciones de la imagen solo compensan una parte del total de los errores presentes y por tanto quedarán parte sin corregir y aunque su

magnitud es habitualmente menor de 10 micras, su propagación en el cálculo, compensación y ajuste del bloque, puede producir deformaciones bastantes importantes.

El modelo típico son las ecuaciones de colinealidad a las que se añaden condiciones (constreñimientos) que refuercen el proceso de ajuste de medidas para formar relaciones funcionales o geométricas y básicamente consiste en aplicar una función polinómica en función de las coordenadas imagen.

Se plantean una serie de incógnitas referidas a:

1. Qué parámetros se van a elegir
2. Cuál es su significado estadístico o su fiabilidad
3. Cuántos juegos de parámetros distintos se pueden aplicar en un mismo bloque

Para responder a estas cuestiones se han desarrollado dos filosofías:

1. La primera trate de identificar las causas físicas que provocan las deformaciones y construir un modelo matemático que las suprima (juego de 21 parámetros de Brown).
2. La segunda enfoca el tema de una manera más empírica estudiando la geometría de la deformación y añadiendo expresiones polinómicas de distinto grado de complejidad. Las más sencillas son las que corrigen los errores sistemáticos en los 9 o en los 25 puntos estándar de la fotografía. Como ejemplo pueden citarse los juegos de 12 y 44 parámetros que recomienda Ebner y Grün.

El modelo más conocido es el de Brown, padre de la técnica de calibración analítica, siendo 21 los parámetros de autocalibración y se seleccionan de acuerdo a causas físicas de errores sistemáticos como son la distorsión radial y por descentramiento de las lentes, deformaciones de la película, y otros coeficientes que definen la curvatura y falta de planeidad de la película.

26.5. Correcciones a las foto-coordenadas

E1 sistema de foto-coordenadas definido se basa en la hipótesis de que la cámara produce una proyección central perfecta del objeto. Esto significa, como hemos visto, que la lente puede considerarse como un punto y los rayos de 1uz que emanan desde cualquier punto objeto en el campo de visión forman una imagen de tal forma que los puntos objeto e imagen y el centro óptico de la lente son colineales.

Sin embargo las coordenadas medidas de las imágenes no verifican esta hipótesis; resultando necesario efectuar correcciones por los siguientes motivos:

1. Los ejes fiduciales no intersecan en el punto principal.
2. Deformación del material fotográfico.
3. Distorsiones del objetivo.
4. Refracción de la atmósfera terrestre.
5. Esfericidad terrestre.

En el primer caso, conocidas las coordenadas fiduciales del punto principal, la corrección por esta causa de las foto-coordenadas medidas se reduce a una mera traslación de ejes. Vamos entonces a ocuparnos con más detalle de las restantes correcciones.

Deformación del material fotográfico.

E1 material fotográfico esta sujeto a deformaciones durante el tiempo que transcurre entre la toma de la fotografía y su medida en el comparador. Con objeto de poder evaluar esta deformación, al menos de forma aproximada, y proceder a la corrección de las foto-coordenadas, se obtiene la distancia teórica dada por la calibración de la cámara entre los marcadores fiduciales opuestos, y se comparan estas distancias con las correspondientes distancias medidas sobre la fotografía, las diferencias obtenidas nos permiten determinar las deformaciones lineales en las direcciones de los ejes fiduciales.
Este es en efecto el modelo mas simple, según el cual si (x_m, y_m) son las distancias fiduciales medidas sobre el positivo, y (x_c, y_c) las calibradas, entonces para cualquier punto imagen a sus coordenadas corregidas vienen dadas por:

$$x'_a = \frac{x_c}{x_m} x_a \quad \text{y} \quad y'_a = \frac{y_c}{y_m} y_a$$

donde (x_a, y_a) son las foto-coordenadas medidas del punto a. Los factores x_c / x_m , y_c / y_m son los factores de escala en las direcciones x e y respectivamente.
Estas correcciones pueden también aplicarse dentro de un proceso más general por medio de los factores de escala en una transformación afín bidimensional. En efecto, supongamos que en un comparador tenemos orientada la fotografía tal y como se muestra en la figura, donde (X, Y) es el sistema de ejes del comparador y (x, y) el sistema fiducial deformado.

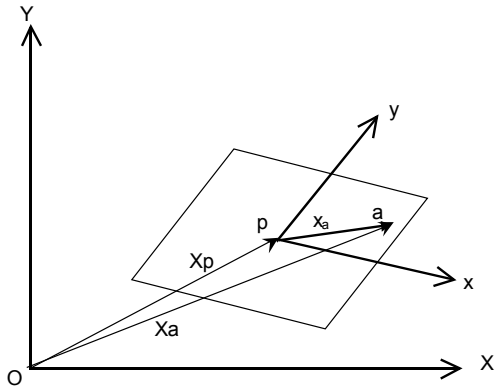


Figura 18.

Una transformación de1 tipo:

$$x' = a_1 + a_2 X + a_3 Y$$

$$y' = b_1 + b_2 X + b_3 Y$$

corrige simultáneamente por deformación del material fotográfico según el modelo anterior, y por orientación y posición del sistema (X, Y) con respecto al sistema (x, y). Los coeficientes incógnitas a_i, b_i pueden estimarse mediante un ajuste de mínimos cuadrados a partir de las coordenadas comparador medidas para cada marca fiducial y sus coordenadas fiduciales teóricas.

Distorsión

Distorsión Radial

Deduzcamos ahora las fórmulas de corrección por distorsión radial de las foto-coordenadas medidas. En la figura se obtienen fácilmente las siguientes relaciones entre la distorsión radial y las diferencias entre las foto-coordenadas medidas del punto imagen real y las foto-coordenadas del punto imagen ideal:

$$\Delta x = -\frac{x}{r}\Delta r \qquad \Delta y = -\frac{y}{r}\Delta r$$

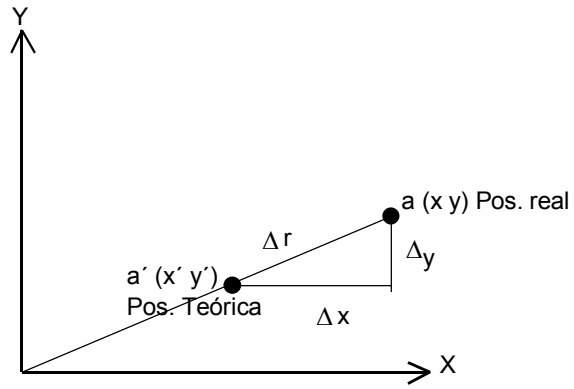


Figura 19.

Sustituyendo en estas últimas ecuaciones la expresión anterior de:

$$\Delta r_c = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7$$

obtenemos finalmente:

$$x' = x\,[1 + (k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4 + k_4 r^7)]$$

$$y' = y\,[1 + \{k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4 + k_4 r^6)]$$

donde (x, y) son las foto-coordenadas medidas en el comparador, (x', y') las foto-coordenadas corregidas, r la distancia del punto imagen al punto principal y k (i=1,..,4) los coeficientes de distorsión radial.

Demostración:

$$\Delta x = x - x' = -\frac{x}{r}\Delta r_c = -\frac{x}{r}(k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7) = -x(k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4 + k_4 r^6) \Rightarrow$$

$$x' = x + x(k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4 + k_4 r^6) = x(1 + (k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4 + k_4 r^6))$$

Análogamente, obtendríamos:

$$y' = y\,(1 + (k_1 + k_2\, r^2 + k_3\, r^4 + k_4\, r^6))$$

Distorsión por Descentramiento

Por lo que respecta a la distorsión por descentramiento, según el modelo de Conrady-Brown, sus dos componentes radial y tangencial se describen analíticamente según las expresiones:

$$\delta_r = 3\,(J_1 r^2 + J_2 r^4 + ...)\ \text{sen}\ (\varphi - \varphi_0)$$

$$\delta_t = \quad (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \ldots)\ \cos\ (\varphi - \varphi_0)$$

donde J_i son los coeficientes de distorsión, φ el ángulo polar del punto imagen con respecto al eje x, y φ_0 el ángulo entre el eje x y una línea de referencia denominada eje de máxima distorsión tangencial (donde además $\delta_r = 0$). Obsérvese que la distorsión tangencial es nula sobre la recta $\varphi = \varphi_0 + \pi / 2$, resultando esta una línea de simetría. Por otra parte, tanto r como

φ están referidos al punto principal que suponemos el origen del sistema de coordenadas imagen. Los parámetros de distorsión son ahora los coeficientes J_i y el ángulo φ_0.

Veamos ahora cuales son las fórmulas de corrección asociadas a esta distorsión. Consideremos para ello la figura en la que p es el punto imagen real y p' el punto imagen en ausencia de distorsión.

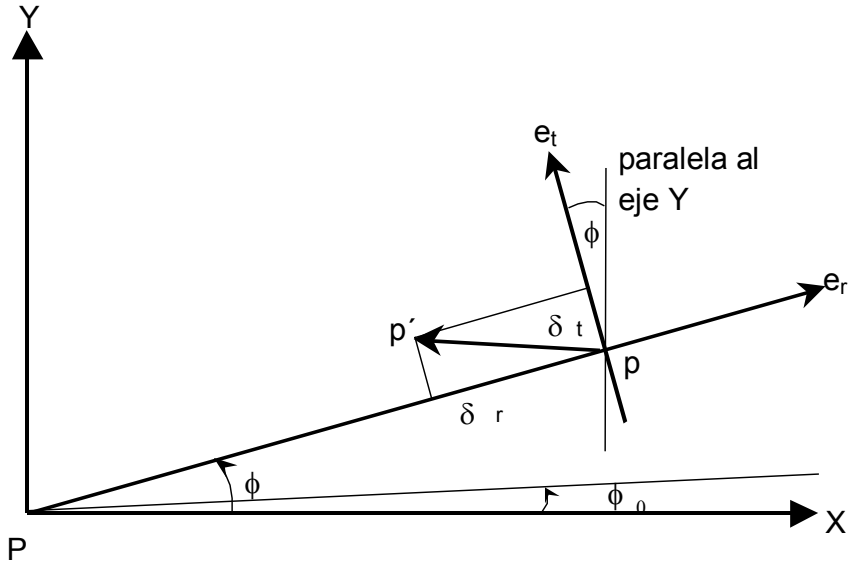


Figura 20.

Tenemos entonces

$$\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x'-x\\ y'-y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi & -\operatorname{sen}\varphi\\ \operatorname{sen}\varphi & \cos\varphi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_r\\ \delta_t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(x/r)\delta_r-(y/r)\delta_t\\ (y/r)\delta_r+(x/r)\delta_t\end{bmatrix}$$

Introduciendo ahora las expresiones de δ_r y δ_t, después de unos sencillos se llega a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta x=\left[P_1(r^2+2x^2)+2P_2xy\right]\left[1+P_3r^2+.....\right]$$

$$\Delta y=\left[2P_1xy+P_2(r^2+2y^2)\right]\left[1+P_3r^2+.....\right]$$

con: $P_1 = -J_1 \operatorname{sen}\varphi_0$, $P_2 = J_1\cos\varphi_0$ y $P_3 = J_2/J_1$

En primer orden de aproximación el desplazamiento total de un punto imagen por causa de la distorsión puede describirse como la suma de los vectores desplazamiento correspondientes a la distorsión radial y a la distorsión por descentramiento; podemos entonces escribir el siguiente modelo general de distorsi6n:

$$\Delta x = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + ...) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy)(1 + P_3 r^2 + ..)$$
$$\Delta y = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + ...) + (2P_1 xy + P_2(r^2 + 2y^{2)})(1 + P_3 r^2 + ..)$$

con k_i y P_i coeficientes de distorsión radial y distorsión por descentramiento respectivamente. Observemos que en esta fórmula las coordenadas (x, y) están referidas al punto principal y que la función de distorsión radial (primer sumando) se supone con respecto a una distancia focal gaussiana, de ahí que no aparezca el término independiente $1 - k_1$.

Refracción atmosférica

Como ya se vio la corrección por refracción atmosférica venía dada por:

$$\Delta r = (f / \cos^2\alpha)\, \Delta\alpha$$

La corrección se hace en los siguiente pasos:

Primero se determina α para cada punto, partiendo de:

$$\text{tag}\ \alpha = (x^2 + y^2)^{1/2} / f$$

así se obtiene α y con este valor de α se obtiene $\Delta\alpha$, a partir de:

$$\Delta\alpha = K\ \text{tg}\ \alpha$$

Conocido $\Delta\alpha$, se calcula:

$$\Delta r = (f\ / \cos^2\alpha)\, \Delta\alpha$$

Aplicando a la distancia radial medida r la corrección Δr dada por:

$$r'' = r - \Delta r$$

Se obtiene la distancia radial r" ya corregida. Finalmente las foto-coordenadas corregidas, se calculan así:

$$x''_a = (r'' / r)\, x_a\ ,\ \ y''_a = (r'' / r)\, y_a$$

Esfericidad

Ya se estudió que este factor es:

$$\Delta r = (H\, r^3) / (2\, R\, f^2),\ \ \text{donde}\ r = (x^2 + y^2)^{1/2}$$

Calculado Δr, se obtiene la distancia radial corregida, con:

$$r'' = r + \Delta r$$

Obteniéndose (x''_a, y''_a) coordenadas corregidas por esfericidad en función de las (x_a, y_a) medidas, mediante las expresiones:

$$x''_a = (r'' / r)\ x_a, \quad y''_a = (r'' / r)\ y_a$$

Aplicando todas las correcciones anteriormente citadas las foto-coordenadas medidas estarán exentas de "distorsiones".

Bibliografía

[1] Brandtatter, G., Otero, J., Romero, P. y Sevilla, M. VI Curso de Geodesia Superior, pág. 78-94

[2] Ghosh, S. Analitical Photogrammetry. Pergamon Press 1988

[3] Kraus, K. Photogrammetry Vol 1.Dummiers Verlag. Bonn 1993

[4] Kraus, K. Photogrammetry Vol 2.Dummiers Verlag. Bonn 1996

[5] Slama, Ch., Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry 1980

Tema 27. Geometría de la foto inclinada: Sistemas de referencia (t, s, α) y (κ,ϕ, ω). Cambios de sistemas. Escala de una foto inclinada. Desplazamientos en la imagen debidos a la inclinación y el relieve.

27. 1. Sistemas de referencia (t, s, α) y (χ, φ, ώ)

Sistema (t, s, α)

En Fotogrametría aérea se entiende por fotografía inclinada una fotografía tomada con el eje óptico desviado de la vertical en una pequeña cantidad, normalmente < 3º.

Pretendemos definir los elementos de orientación exterior de una fotografía con estas características y deducir información del terreno a partir de fotografías aisladas basándonos en el conocimiento de estos elementos.

En la figura tenemos representada una fotografía inclinada con sus principales elementos que vamos a definir a continuación**.**

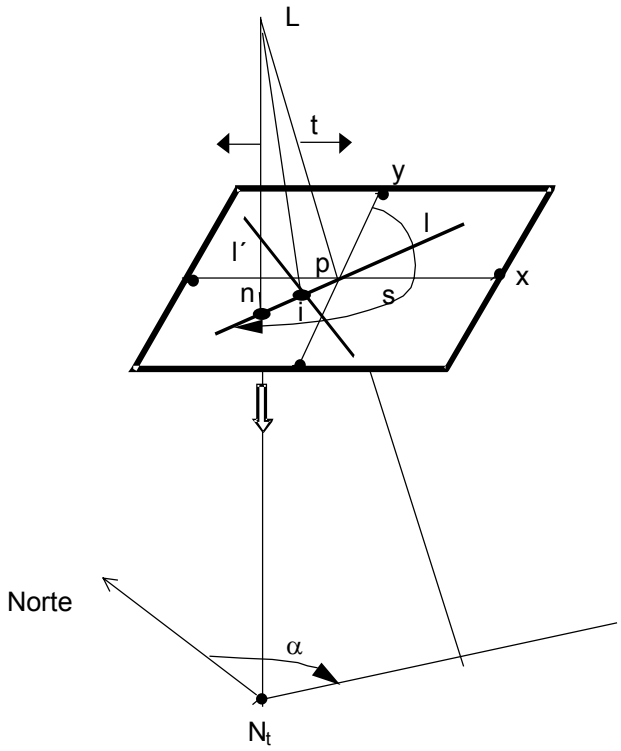


Figura 1.

La inclinación de la fotografía es el ángulo t que forman en L el eje óptico de la cámara con la vertical por L. Es decir, es el ángulo entre el plano de la fotografía y un plano horizontal.

El punto nadir imagen n es el punto intersección del plano de la fotografía con la vertical por L. La intersección de esta recta con el terreno se denomina punto nadir terreno y se designa N_t.

El plano principal es el plano vertical que contiene al eje óptico. En la figura es el plano nLp.

La línea principal es la recta intersección del plano principal con el plano de la fotografía. En geometría descriptiva se denomina línea de máxima pendiente.

El isocentro i es el punto intersección de la bisectriz del ángulo t con el plano de la fotografía. Este punto está en la línea principal a una distancia f tg(t / 2) del punto principal. (Observación: i no es el punto medio entre el punto nadir imagen y el punto principal).

El eje de inclinación l' también denominado línea paralela isométrica, es la línea en el plano de la fotografía perpendicular por el isocentro a la línea principal. Esta línea es horizontal, al igual que todas las rectas perpendiculares a la línea principal sobre el plano de la fotografía.

El ángulo de oscilación s es el ángulo medido en sentido retrógrado entre el eje fiducial y, y la semirrecta que une el punto principal con el punto nadir imagen. Este ángulo establece la dirección de la inclinación de la fotografía con respecto a los ejes fiduciales.

El acimut del plano principal α es el ángulo con origen en N_t y medido en sentido retrógrado desde la dirección Norte al plano principal de la fotografía. Este ángulo se denomina a veces acimut de la fotografía y define la dirección de la inclinación de la fotografía con respecto al terreno.

El sistema de ángulos (t, s, α) define completamente la orientación angular de la fotografía en el espacio con respecto a un sistema de referencia localmente vertical, esto es:

Eje Z en la dirección de la vertical por L

Plano XY perpendicular al eje Z por N_t con eje Y en la dirección del Norte.

Junto con la posición espacial de la fotografía que en este sistema local esta definida por la altura del vuelo, estos ángulos constituyen los elementos de orientación exterior de la fotografía.

En una fotografía estrictamente vertical los puntos nadir e isocentro coinciden con el punto principal y se cumple que t = 0º. En este caso, los ángulos s y α están indeterminados y el eje de inclinación no existe. Esto es un inconveniente para la solución de muchos problemas en fotogrametría analítica, ya que se necesita tener valores aproximados de los elementos de orientación exterior y en fotogrametría aérea es normal suponer en primera aproximación que las fotografías son verticales.

Por otra parte, este sistema de referencia es en parte intrínseco a la propia fotografía y podría ser adecuado para la obtención de información a partir de fotografías individuales, no siendo práctica la utilización de estos sistemas de referencia en problemas en donde intervienen dos o más fotografías**.**

Sistema (χ, ϕ, $\acute{\omega}$)

Construcción de matrices ortogonales

Construir una matriz de rotación ortogonal consiste en elegir tres parámetros y expresar los nueve elementos de la matriz en función de ellos. Para ello imaginemos que la situación de los dos sistemas sea la de la figura siguiente.

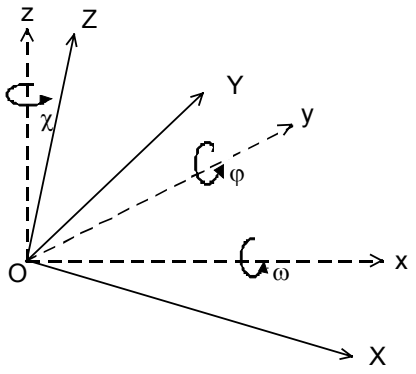


Figura 2.

Sean los triedros (oxyz) y (OXYZ) y supongamos que el triedro (oxyz) tenga la posibilidad de girar en torno a sus ejes y que estos giros sean:

Un giro ϖ o rotación lateral o transversal en torno al eje Ox.

Un giro φ o rotación longitudinal en torno al eje Oy.

Un giro χ o rotación azimutal en torno al eje Oz.

El sentido positivo de estos giros es como se indica en la figura. Coincide con el recomendado por la Asamblea de la Sociedad Internacional de Fotoqrametría y es el de las agujas del reloj visto por un observador supuesto en el origen mirando en la dirección de los ejes en su sentido positivo.

Cada giro introducirá variaciones en las coordenadas (x, y, z) de un punto cualquiera según las ecuaciones de una rotación plana, teniendo en cuenta que la coordenada que se mide en el eje en torno del cual se efectúa el giro no variará con este. Si después de un cierto número de giros el triedro (Oxyz) ha sido llevado en coincidencia con el (OXYZ), las coordenadas (x, y. z) de P se habrán transformado en las (X, Y, Z).

Vamos a mostrar como puede conseguirse esto con tres rotaciones utilizando una sola vez cada posibilidad de giro.

Primera rotación

En torno al eje Ox y giro ϖ

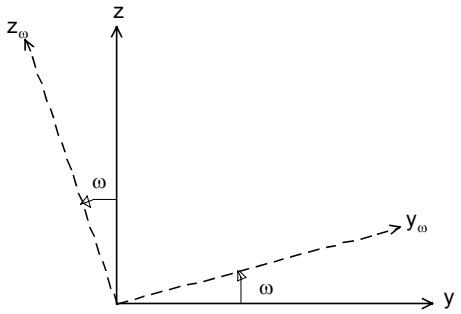


Figura 3.

El eje Ox no se moverá.

Los ejes Oy y Oz pasarán a la nueva posición Oy_ϖ, Oz_ϖ

Las nuevas coordenadas transformadas (x_ϖ, y_ϖ, z_ϖ) están relacionadas con las antiguas (x, y, z) mediante:

$$x_\varpi = x$$

$$y_\varpi = y\cos\varpi + z\,\mathrm{sen}\varpi$$

$$z_\varpi = -y\,\mathrm{sen}\varpi + z\cos\varpi$$

$$\begin{bmatrix} x_\varpi \\ y_\varpi \\ z_\varpi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varpi & \mathrm{sen}\,\varpi \\ 0 & -\mathrm{sen}\,\varpi & \cos\varpi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Segunda rotación

En torno al nuevo eje y_ϖ y giro φ

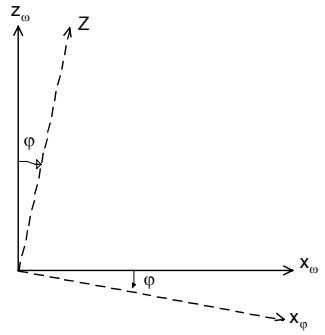


Figura 4.

El giro ha de ser de tal magnitud que el eje z_{ϖ} vaya a coincidir con el eje OZ.

El eje y_{ϖ} no se mueve.

El eje Ox_{ϖ} pasa a ser el Ox_{φ}.

Las nuevas coordenadas (x_{φ}, y_{φ}, z_{φ}) están relacionadas con las anteriores así:

$$x_{\varphi} = x_{\varpi} \cos\varphi - z_{\varpi} \operatorname{sen}\varphi$$
$$y_{\varphi} = y_{\varpi}$$
$$Z = x_{\varpi} \operatorname{sen}\varphi + z_{\varpi} \cos\varphi$$

Es decir:

$$\begin{bmatrix} x_{\varphi} \\ y_{\varphi} \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\operatorname{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_{\varpi} \\ y_{\varpi} \\ z_{\varpi} \end{bmatrix}$$

Tercera rotación

En torno al eje Z. Giro χ

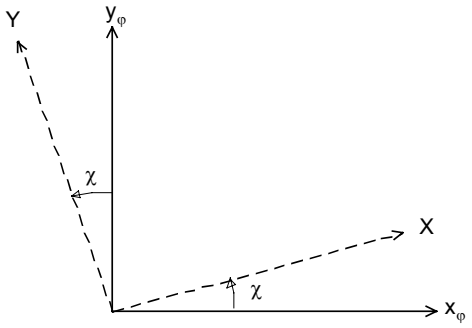


Figura 5.

El giro χ ha de ser de tal magnitud que los ejes Ox_{φ} y Oy_{φ} vayan a coincidir con los OX y OY.

El eje OZ no se mueve.

Se ha logrado la coincidencia de los ejes en ambos triedros.

Las coordenadas finales (X, Y, Z) están relacionadas con las anteriores mediante:

$$X = x_{\varphi} \cos\chi + y_{\varphi} \operatorname{sen}\chi$$
$$Y = -x_{\varphi} \operatorname{sen}\chi + y_{\varphi} \cos\chi$$
$$Z = Z$$

Es decir:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\chi & \text{sen}\,\chi & 0 \\ -\text{sen}\,\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_\varphi \\ y_\varphi \\ Z \end{bmatrix}$$

Llevando los valores anteriormente obtenidos, queda:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\chi & \text{sen}\,\chi & 0 \\ -\text{sen}\,\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\text{sen}\,\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\,\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varpi & \text{sen}\,\varpi \\ 0 & -\text{sen}\,\varpi & \cos\varpi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathrm{K} * \Phi * \Omega * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = Rz(\chi) * Ry(\varphi) * Rx(\varpi) * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

llamando K, Φ y Ω a las matrices de rotación de los ángulos χ, φ y ϖ respectivamente y efectuando el producto de estas tres matrices se obtiene:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\chi\cos\varphi & \text{sen}\,\chi\cos\varpi + \cos\chi\,\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\varpi & \text{sen}\,\chi\,\text{sen}\,\varpi - \cos\chi\,\text{sen}\,\varphi\cos\varpi \\ -\text{sen}\,\chi\cos\varphi & \cos\chi\cos\varpi - \text{sen}\,\chi\,\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\varpi & \cos\chi\,\text{sen}\,\varpi + \text{sen}\,\chi\,\text{sen}\,\varphi\cos\varpi \\ \text{sen}\,\varphi & -\cos\varphi\,\text{sen}\,\varpi & \cos\varphi\cos\varpi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

En la figura el sistema (x, y, z) es el sistema imagen definido por las marcas fiduciales y el sistema (X, Y, Z) es un sistema de referencia exterior, que denominaremos sistema de referencia objeto, (sistema terreno) al cual referiremos la posición espacial del centro perspectivo de la cámara L y de los puntos sobre el terreno. Tenemos la matriz de rotación M, dada por:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\chi & \text{sen}\,\varpi\,\text{sen}\,\varphi\cos\chi + \cos\varpi\,\text{sen}\,\chi & -\cos\varpi\,\text{sen}\,\varphi\cos\chi + \text{sen}\,\varpi\,\text{sen}\,\chi \\ -\cos\varphi\,\text{sen}\,\chi & -\text{sen}\,\varpi\,\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\chi + \cos\varpi\cos\chi & \cos\varpi\,\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\chi + \text{sen}\,\varpi\cos\chi \\ \text{sen}\,\varphi & -\text{sen}\,\varpi\cos\varphi & \cos\varpi\cos\varphi \end{bmatrix}$$

Los ángulos (χ, φ, ώ) son por tanto los elementos de orientación angular de la fotografía, y junto con las coordenadas espaciales del punto L constituyen los seis elementos de orientación exterior.

El motivo de la adopción de estos ángulos rotacionales es que se utilizan para designar los ejes de rotación mecánicos en instrumentos de restitución analógicos con un significado similar al aquí empleado.

La estructura de la matriz de orientación en función de los ángulos t, s, y α del sistema anterior, es:

$$M = R_3(v) * R_1(t) * R_3(-\alpha), \text{ donde } v = s - 180.$$

Tenemos, en este caso, que la expresión de la matriz M, será:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos v + sen\alpha\cos tsenv & -sen\alpha\cos v + \cos\alpha\cos tsenv & senvsent \\ -\cos\alpha senv + sen\alpha\cos t\cos v & sen\alpha senv + \cos\alpha\cos t\cos v & sent\cos v \\ -sen\alpha sent & -\cos\alpha sent & \cos t \end{bmatrix}$$

27. 2. Cambios de sistemas

Supongamos que el sistema de referencia objeto es un sistema localmente vertical. Estamos ahora interesados en la determinación de (χ, φ, ω) a partir de (t, s, α) y viceversa. Esto lo haremos por medio de la matriz de orientación M.

1) (χ, φ, ω) $\rightarrow$ (t, s, α)

Conocidos los ángulos (χ, φ, ω) podemos calcular los elementos m_{ij} de la matriz M. Entonces, según las ecuaciones anteriores tenemos:

$$\cos t = m_{33},,(\text{sen } t \geq 0),, tags = \frac{-\text{sen } t\,\text{sen } s}{-\text{sen } t\cos s} = \frac{m_{13}}{m_{23}},, tag\alpha = \frac{-\text{sen}\,\alpha\,\text{sen } t}{-\cos\alpha\,\text{sen } t} = \frac{m_{31}}{m_{32}}$$

De estas relaciones, y según la siguiente tabla, pueden deducirse los ángulos (t, s, α).

m_{13} m_{31}	m_{23} m_{32}	Cuadrante de s, α
-	-	1
-	+	2
+	+	3
+	-	4

2) (t, s, α) $\rightarrow$ (χ, φ, ω)

De forma análoga al caso anterior deducimos:

$$\text{sen}\,\varphi = m_{31}, , - \text{tg}\,\varpi = \frac{-\text{sen}\,\varpi\cos\varphi}{\cos\varpi\cos\varphi} = \frac{m_{32}}{m_{33}}, , - \text{tg}\,\chi = \frac{-\cos\varphi\,\text{sen}\,\chi}{\cos\varphi\cos\chi} = \frac{m_{21}}{m_{11}}$$

donde los m_{ij} se pueden calcular ahora según las expresiones anteriores. Con la convención de signos para (χ, φ, ω) y teniendo en cuenta que en valor absoluto ώ y φ son menores de 90º, tenemos:

φ es positivo (negativo) si m_{31} es positivo (negativo).

En cualquier caso $\cos\omega \geq 0$; si m_{32} / m_{33} es negativo (positivo), ω es positivo (negativo).

χ puede tomar cualquier valor entre 0º y 360º, y su cuadrante puede determinarse según las siguientes relaciones:

m_{11}	m_{21} / m_{11}	Cuadrante de χ
+	-	1
-	+	2
-	-	3
+	+	4

27.3. Escala de una foto inclinada

Vamos a emplear un nuevo sistema rectangular de coordenadas sobre la fotografía, dado por:

- Origen el punto nadir imagen.
- Eje y' la línea principal, positivo en el sentido punto nadir hacia el punto principal.
- Eje x' se elige de tal forma que la referencia sea directa (esto Es 90º en sentido retrógrado desde y').

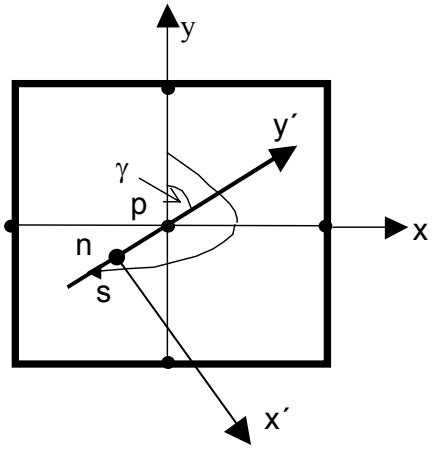


Figura 6.

Puesto que la distancia entre n y p es f tgt, la relación entre el sistema (x', y') y el sistema de ejes fiduciales (x, y) es:

$$x' = x \cos\nu - y \operatorname{sen}\nu$$

$$y' = x \operatorname{sen}\nu + y \cos\nu + f \operatorname{tgt}$$

donde $\nu = s - 180^{o}$

Empecemos considerando el caso de una fotografía estrictamente vertical de una zona de terreno sin relieve. En este caso ideal tenemos que la imagen fotográfica tiene una escala uniforme igual a la razón entre la focal f y la altura de vuelo H:

$$E = f / H$$

En el caso real (terreno con relieve), la escala de una fotografía vertical varía de un punto a otro dependiendo de la elevación de los puntos con respecto a un plano horizontal de referencia.

En un punto imagen a, la escala será:

$$E = f / (H - h_A)$$

donde h_A es la elevación del punto objeto A.

En una fotografía inclinada, aún en ausencia de relieve, la escala no es uniforme pues depende de la inclinación, la altura de vuelo, la focal y la posición del punto imagen en la fotografía. Es decir, la escala es mayor en la parte inferior (y' < 0) que en la superior (y' > 0). Para ello:

Consideremos un punto imagen a y el plano horizontal que lo contiene, este plano se encuentra a una distancia f'_a del punto L, y la escala de la fotografía en ese punto viene definida, en ausencia de relieve, por:

$E = f'_a / H$ siendo H la altura de vuelo.

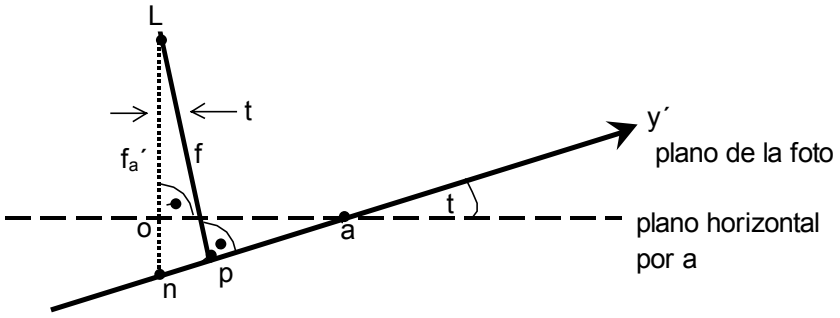


Figura 7.

Para el punto imagen a, unos sencillos cálculos nos permiten escribir:

$$f'_a = Lo = Ln - no \;,,$$

donde:

$$\cos t = f / Ln \Rightarrow Ln = f \sec t$$

$$\text{sent} = no / y'_a \Rightarrow no = y'_a \,\text{sent}$$

de ambas expresiones se deduce que:

$$f'_a = f \sec t - y'_a \,\text{sent}$$

Con lo que la expresión final para la escala de una fotografía inclinada en el caso general en que los puntos del terreno estén a una elevación h con respecto al plano horizontal de referencia es:

$$E = \frac{f \sec t - y'_a \,\text{sen}\, t}{H - h_a}$$

Observamos que en el caso particular t = 0º esta expresión coincide con la establecida para una fotografía vertical. La determinación de la escala de una fotografía inclinada, según la expresión anterior requiere el conocimiento de el ángulo de oscilación s, la inclinación de la fotografía t, ambos elementos de orientación angular y la altura de vuelo como elemento de orientación lineal.

Asociado a esta fotografía consideramos un sistema de referencia (pseudo-exterior), con:

Origen en el punto nadir datum N (intersección del plano horizontal de referencia con la vertical por L).

Eje Y en el plano principal.

Eje Z vertical.

Eje X formando un triedro directo.

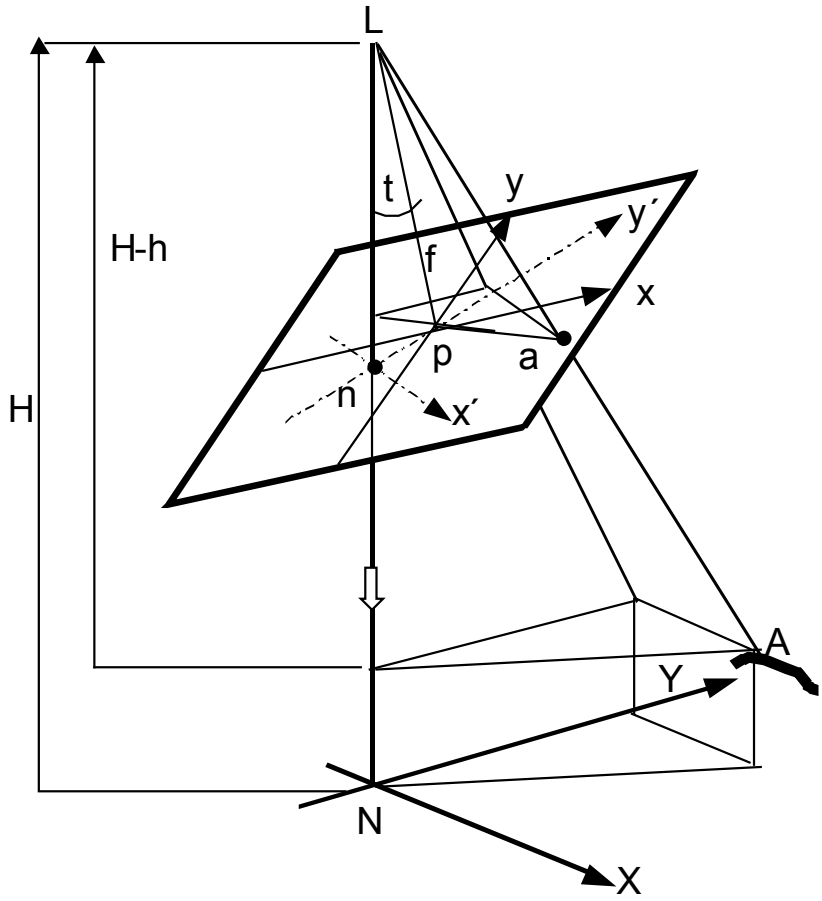


Figura 8.

En la línea del razonamiento anterior, se verifica que:

$$X_A = E_a^{-1} x'_a = \frac{H - h_a}{f \sec t - y'_a \operatorname{sen} t} x'_a$$

Por lo que respecta a la coordenada Y, se verifica que:

$$Y_A = E_a^{-1} y'_a \cos t = \frac{H - h_a}{f \sec t - y'_a \operatorname{sen} t} y'_a \cos t$$

Donde como se dijo anteriormente las coordenadas (x', y') se obtienen a partir de las foto-coordenadas (x, y) medidas en el comparador por medio de las ecuaciones de transformación:

$$x' = x \cos\nu - y \operatorname{sen}\nu$$

$$y' = x \operatorname{sen}\nu + y \cos\nu + f \operatorname{tag} t$$

La determinación de las coordenadas terreno (X, Y) permite la obtención de propiedades métricas del terreno fotografiado, que son independientes del sistema de referencia exterior. Así

se pueden calcular distancias, ángulos, etc., siendo el sistema rectangular de coordenadas el de la siguiente figura.

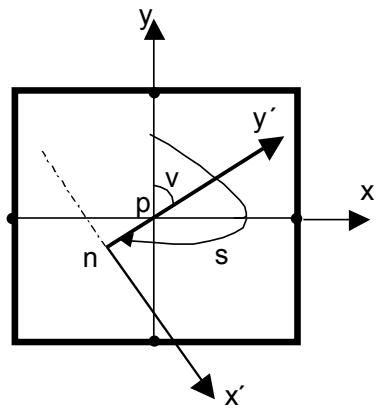


Figura 9.

27. 4. Desplazamientos en la imagen debidos a la inclinación y el relieve

Dada una fotografía inclinada, se denomina fotografía vertical equivalente, a una fotografía teórica estrictamente vertical tomada en la misma estación L con una cámara de igual focal que la correspondiente a la fotografía inclinada.

El eje de inclinación es la intersección del plano de la fotografía inclinada (Π_f) y el plano definido por la fotografía vertical equivalente (Π_v).

E1 desplazamiento de la imagen debido a la inclinación de la fotografía es la diferencia entre la posición de la imagen de un punto sobre la fotografía vertical equivalente y la posición de la imagen en la fotografía inclinada.
Este desplazamiento se realiza en direcciones radiales desde el isocentro y en puntos por encima del eje de inclinación el desplazamiento es positivo y negativo para puntos por debajo del eje de inclinación.

Veamos ahora como puede calcularse este desplazamiento de la imagen. Consideremos primero el caso más sencillo en que las imágenes estén sobre la línea principal.

Según la figura siguiente, para los puntos A y B el desplazamiento de sus imágenes viene dado por:

Λ_a = ia" - ia (< 0)

Λ_b = ib" - ib (> 0)

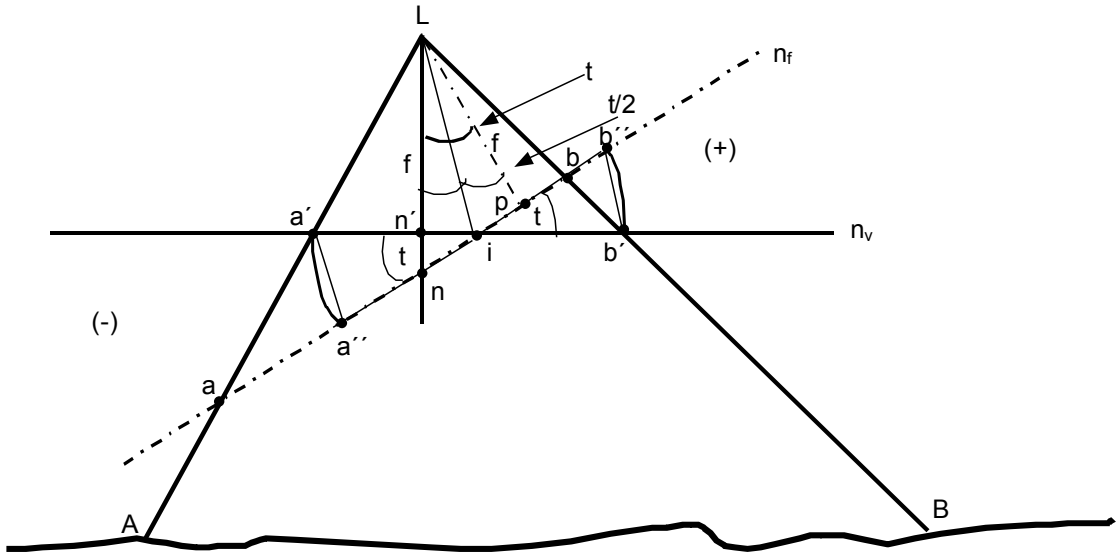


Figura 10.

donde a" y b" son las imágenes de a' y b' después de la rotación de amplitud t y eje el eje de inclinación que lleva la fotografía vertical a coincidir con la inclinada. Designemos por r la distancia de a al isocentro. Por semejanza de los triángulos Lia y a'a"a, tenemos:

$$\Lambda = \frac{r^2 \operatorname{sen} t}{f + r \operatorname{sen} t}$$

fórmula válida para todo punto cuya imagen se encuentre sobre la línea principal en la mitad inferior de la fotografía.

Para los puntos que como el B tienen su imagen por encima del eje de inclinación, un razonamiento similar conduce a la fórmula:

$$\Lambda = \frac{r^2 \operatorname{sen} t}{f - r \operatorname{sen} t}$$

Demostración

1) Λ_a = ia"-ia < 0

Por semejanza de los triángulos Lia y a'a"a, tenemos:

$$\frac{Li}{r} = \frac{a' a''}{\Delta}$$

En el triángulo Lip, se verifica:

$$Li = \frac{f}{\cos(t/2)}$$

En el triángulo ia"a', se verifica:

$$a'a'' = 2\ (r - \Lambda)\ \mathrm{sen}(t/2)$$

sustituyendo, queda:

$$\frac{f/\cos(t/2)}{r} = \frac{2(r-\Lambda)\mathrm{sen}(t/2)}{\Lambda} \Rightarrow f\Lambda = r(r-\Lambda)2\cos(t/2)\mathrm{sen}(t/2) = r(r-\Lambda)\mathrm{sen}\,t \Rightarrow$$

$$f\Lambda + r\Lambda\,\mathrm{sen}\,t = r^2\,\mathrm{sen}\,t \Rightarrow \Lambda = \frac{r^2\,\mathrm{sen}\,t}{f + r\,\mathrm{sen}\,t},, donde \Lambda < 0$$

2) Λ_b = ib"–ib >0

Por semejanza de los triángulos Lib y bb"b' tenemos:

$$\frac{Li}{ib} = \frac{b''b'}{bb''} \Rightarrow \frac{f/\cos(t/2)}{r} = \frac{b''b'}{\Lambda}$$

En el triángulo ib"b' se verifica que: b"b' = 2 (r + Λ) sen(t / 2), luego:

$$\frac{f/\cos(t/2)}{r} = \frac{2(r+\Lambda)\mathrm{sen}(t/2)}{\Lambda} \Rightarrow f\Lambda = r(r+\Lambda)2\cos(t/2)\mathrm{sen}(t/2) \Rightarrow$$

$$f\Lambda = r(r+\Lambda)\mathrm{sen}\,t \Rightarrow f\Lambda - r\Lambda\,\mathrm{sen}\,t = r^2\,\mathrm{sen}\,t \Rightarrow \Lambda = \frac{r^2\,\mathrm{sen}\,t}{f - r\,\mathrm{sen}\,t},, donde \Lambda > 0$$

En el caso general (puntos fuera de la línea principal), el valor absoluto de este desplazamiento viene dado por:

$$|\Lambda| = \frac{r^2\,\mathrm{sen}\,t\cos\lambda}{f \pm r\,\mathrm{sen}\,t\cos\lambda}$$

donde λ es el ángulo en el plano de la fotografía medido en sentido retrógrado desde la parte superior de la línea principal a la recta que une el isocentro y el punto imagen.

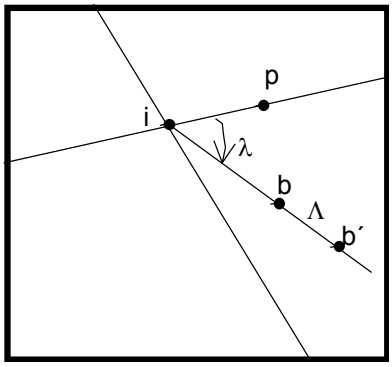


Figura 11.

Bibliografía

[1] Brandtatter, G., Otero, J., Romero, P. y Sevilla, M. VI Curso de Geodesia Superior, pág. 95-106

[2] Ghosh, S. Analitical Photogrammetry. Pergamon Press 1988

[3] Kraus, K. Photogrammetry Vol 1.Dummiers Verlag. Bonn 1993

[4] Kraus, K. Photogrammetry Vol 2.Dummiers Verlag. Bonn 1996

[5] Slama, Ch., Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry 1980

Tema 28. Fundamentos de la fotogrametría analítica: Ecuaciones de colinealidad. Linealización de las ecuaciones de colinealidad. Modelo matemático y resolución del sistema de ecuaciones. Condición de coplanariedad. Distintos casos de creación analítica de modelos. Solución de los problemas fotogramétricos de intersección inversa, intersección directa y orientación relativa.

28.1. Ecuaciones de colinealidad

Las ecuaciones de colinealidad surgen al expresar analíticamente el hecho de que idealmente el punto objeto, su imagen y el centro de la perspectiva (punto nodal anterior) son colineales, es decir están en una misma línea recta.

Sea a la imagen del punto objeto A.

- (x', y', z') el sistema de referencia que hemos designado imagen o instrumental
- (X, Y, Z) el sistema de referencia exterior objeto

En el sistema (x' y' z') la colinealidad de L, a y A se expresa mediante la ecuación:

$$(x'_a, y'_a, z'_a) = \lambda_a (x'_A, y'_A, z'_A) \quad ,, \lambda_a \in R$$

donde:

$$(x'_a, y'_a, z'_a) \text{ y } (x'_A, y'_A, z'_A)$$

son los vectores de posición de a y A en este sistema.

Si consideramos la matriz de orientación M, tenemos:

$$(x'_A, y'_A, z'_A) = M (X_A - X_L, Y_A - Y_L, Z_A - Z_L)$$

donde (X_A, Y_A, Z_A) y (X_L, Y_L, Z_L) son los vectores de posición de A y L, respectivamente en el sistema (X, Y, Z).

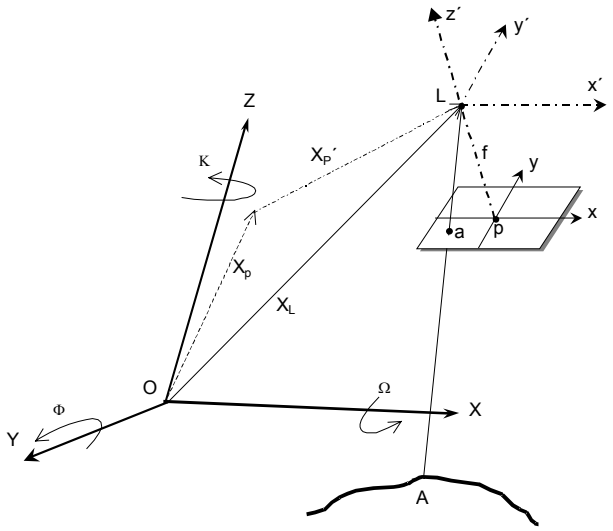


Figura 1.

De estas dos ecuaciones se deduce:

$$(x'_a, y'_a, z'_a) = \lambda_a M (X_A - X_L, Y_A - Y_L, Z_A - Z_L) \quad ,, \quad \lambda_a \in R$$

Dado que para todo punto imagen p, se verifica que:

$$(x'_a, y'_a, z'_a) = (x_a, y_a, -f)$$

tendremos que:

$$(x_a, y_a, -f) = \lambda_a M (X_A - X_L, Y_A - Y_L, Z_A - Z_L) \quad ,, \quad \lambda_a \in R$$

haciendo:

$$m_1 = m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)$$
$$m_2 = m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)$$
$$m_3 = m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)$$

y sustituyendo λ de la tercera ecuación en las dos primeras queda:

$$x_a = -f\frac{m_1}{m_3}, , y_a = -f\frac{m_2}{m_3}$$

donde los elementos m_{ij} de la matriz M son:

$m_{11} = \cos\varphi \cos\chi$ $m_{12} = \text{sen}\omega \,\text{sen}\varphi \cos\chi + \cos\omega \,\text{sen}\chi$ $m_{13} = -\cos\omega \,\text{sen}\,\varphi \cos\chi + \text{sen}\omega \,\text{sen}\chi$

$m_{21} = -\cos\varphi \,\text{sen}\chi$ $m_{22} = -\text{sen}\omega \,\text{sen}\varphi \,\text{sen}\chi + \cos\omega \cos\chi$ $m_{23} = \cos\omega \,\text{sen}\varphi \,\text{sen}\chi + \text{sen}\omega \cos\chi$

$m_{31} = \text{sen}\phi$ $m_{32} = -\text{sen}\omega \cos\varphi$ $m_{33} = \cos\omega \cos\varphi$

Las ecuaciones obtenidas son las ecuaciones de colinealidad que establecen una relación funcional entra las foto-coordenadas de un punto imagen a con las coordenadas espaciales de A y los elementos de orientación exterior dados por $(X_L, Y_L, Z_L, \omega, \varphi, \chi)$ de la fotografía.

28.2. Linealización de las ecuaciones de colinealidad

Para la aplicación de estas fórmulas debido a su carácter no lineal hay que obtener las correspondientes ecuaciones linealizadas, que puede conseguirse calculando por derivación directa las diferentes derivadas parciales respecto a ω, φ, χ, etc. de las funciones que intervienen en:

$$x_a = x_a(\varpi, \varphi, \chi, X_L, Y_L, Z_L, X_A, Y_A, Z_A) = -f\frac{m_1}{m_3}$$

$$y_a = y_a(\varpi, \varphi, \chi, X_L, Y_L, Z_L, X_A, Y_A, Z_A) = -f\frac{m_2}{m_3}$$

Este proceso puede simplificarse haciendo uso de propiedades de las matrices de rotación.

Para mayor generalidad, no consideraremos los subíndices a y A en las foto-coordenadas ni en las coordenadas espaciales.

Diferenciando se obtiene, en forma matricial:

$$dx = A\, dm$$

donde:

$$dx = (dx,\ dy)^T,,\quad dm = (dm_1, dm_2, dm_3)^T$$

y

$$A = \frac{\delta(x,y)}{\delta(m_1,m_2,m_3)} = \frac{-f}{m_3}\begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-m_1}{m_3} \\ 0 & 1 & \frac{-m_2}{m_3} \end{bmatrix}$$

Por otra parte, diferenciando $m = M\,(X-X_L)$, tenemos:

$$dm = dM\,(X-X_L) + M\,(dX-dX_L) = dM\,M^T m + M\,(dX-dX_L)$$

Sustituyendo en la expresión anterior, resulta:

$$dx = A\,dM\,M^T m + A\,M\,(dX-dX_L).$$

Si ahora diferenciamos la relación $M\,M^T = I$ (que expresa la ortogonalidad de la matriz M), siendo I la matriz identidad, se deduce que:

$$-\,dM\,M^T = M\,(dM)^T$$

lo que demuestra el carácter antisimétrico ($B = -\,B^T$) de la matriz $dM\,M^T$

Esta matriz es la matriz de Cartan asociada a la matriz M, y la designaremos por Ω(M). Sin perdida de generalidad, podemos entonces suponer:

$$\Omega(M)=\begin{bmatrix} 0 & \Omega_1 & \Omega_2 \\ -\Omega_1 & 0 & \Omega_3 \\ -\Omega_2 & -\Omega_3 & 0 \end{bmatrix}$$

y por tanto:

$$A\Omega(M)=\frac{-f}{m_3}\begin{bmatrix} (m_1/m_3)\Omega_2 & \Omega_1+(m_1/m_3)\Omega_3 & \Omega_2 \\ -\Omega_1+(m_2/m_3)\Omega_2 & (m_2/m_3)\Omega_3 & \Omega_3 \end{bmatrix}$$

$$A\Omega(M)m=\frac{-f}{m_3}\begin{bmatrix} m_2 & (m^2{}_1/m_3)+m_3 & (m_1m_2/m_3) \\ -m_1 & (m_1m_2/m_3) & (m^2{}_2/m_3)+m_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix}$$

En definitiva, puede escribirse:

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}=\frac{-f}{m_3}\begin{bmatrix} m_2 & (m^2{}_1/m_3)+m_3 & (m_1m_2/m_3) \\ -m_1 & (m_1m_2/m_3) & (m^2{}_2/m_3)+m_3 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix}+AM\begin{bmatrix} dX-dX_L \\ dY-dY_L \\ dZ-dZ_L \end{bmatrix}$$

Veamos ahora como se realiza el calculo de los Ω. Las matrices de Cartan gozan de la propiedad siguiente:

$$\Omega(A, B, C) = \Omega(A) + A\ \Omega(B)\ A^T + A\ B\ \Omega(C)\ B^T\ A^T$$

donde A, B y C son matrices ortogonales.

Para la matriz $M = (R_3, R_2, R_1)$, será:

$$\Omega(M) = \Omega(R_3) + R_3\ \Omega(R_2)\ R_3{}^T + R_3\ R_2\ \Omega(R_1)\ R_2{}^T\ R_3{}^T$$

Las matrices de Cartan asociadas a las matrices de rotación vienen dadas por:

$$\Omega(R_1)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}d\omega,,\Omega(R_2)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}d\varphi,,\Omega(R_3)=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}d\chi$$

Realizando las operaciones que se indican, resulta:

$$\Omega(M)=\begin{bmatrix} 0 & d\chi+\operatorname{sen}\varphi d\omega & -\cos\chi d\varphi+\cos\varphi\operatorname{sen}\chi d\varpi \\ -d\chi-\operatorname{sen}\varphi d\varpi & 0 & \operatorname{sen}\chi d\varphi+\cos\varphi\cos\chi d\omega \\ \cos\chi d\varphi-\cos\varphi\operatorname{sen}\chi d\omega & -\operatorname{sen}\chi d\varphi-\cos\varphi\cos\chi d\varpi & 0 \end{bmatrix}$$

De esta expresión se deduce:

$$\begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sen}\varphi & 0 & 1 \\ \cos\varphi \operatorname{sen}\chi & -\cos\chi & 0 \\ \cos\varphi \cos\chi & \operatorname{sen}\chi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varpi \\ d\varphi \\ d\chi \end{bmatrix}$$

Sustituyendo y evaluando la matriz AM se obtienen finalmente las expresiones linealizadas de las ecuaciones de colinealidad en la forma:

$$dx^T = - f / m_3 [P\ dR + Q\ (dX - dX_L)]$$

donde:

$dR = (d\omega , d\varphi , d\chi)$ y las matrices $P = (p_{ij})$ y $Q = (q_{ij})$ son los elementos siguientes:

$P_{11} = m_2 \operatorname{sen}\varphi + [m^2_1/m_3 + m_3] \cos\varphi \operatorname{sen}\chi + \{m_1 m_2/m_3] \cos\varphi \cos\chi$

$P_{12} = - [m^2_1 / m_3 + m_3] \cos\chi + \{m_1 m_2 / m_3] \operatorname{sen}\chi$

$P_{13} = m_2$

$P_{21} = - m_1 \operatorname{sen}\varphi + [m^2_2 / m_3 + m_3] \cos\varphi \cos\chi + \{m_1 m_2 / m_3] \cos\varphi \operatorname{sen}\chi$

$P_{22} = [m^2_2 / m_3 + m_3] \operatorname{sen}\chi - \{m_1 m_2 / m_3] \cos\chi$

$P_{23} = - m_1$

$q_{11} = m_{11} - (m_1 / m_3)\ m_{31}$

$q_{12} = m_{12} - (m_1 / m_3)\ m_{32}$

$q_{13} = m_{13} - (m_1 / m_3)\ m_{33}$

$q_{21} = m_{21} - (m_2 / m_3)\ m_{31}$

$q_{22} = m_{22} - (m_2 / m_3)\ m_{32}$

$q_{23} = m_{23} - (m_2 / m_3)\ m_{33}$

28.3. Modelo matemático y resolución del sistema de ecuaciones

Sean (x_{ij}, y_{ij}) las foto-coordenadas de la imagen de un punto j en la fotografía i de un bloque fotogramétrico. Las ecuaciones de colinealidad asociadas a este punto pueden entonces escribirse de la forma:

$$x_{ij} = -f \frac{m^i_{11}(X_j - X^L_i) + m^i_{12}(Y_j - Y^L_i) + m^i_{13}(Z_j - Z^L_i)}{m^i_{31}(X_j - X^L_i) + m^i_{32}(Y_j - Y^L_i) + m^i_{33}(Z_j - Z^L_i)}$$

$$y_{ij} = -f \frac{m^i_{21}(X_j - X^L_i) + m^i_{22}(Y_j - Y^L_i) + m^i_{23}(Z_j - Z^L_i)}{m^i_{31}(X_j - X^L_i) + m^i_{32}(Y_j - Y^L_i) + m^i_{33}(Z_j - Z^L_i)}$$

donde (X_j, Y_j, Z_j) y (X^L_i, Y^L_i, Z^L_i) son las coordenadas cartesianas del punto j y del centro de perspectiva de la fotografía i respectivamente en el sistema de referencia (terreno) al cual tenemos referidas la posición de los puntos de control y (m^i_{kl}) son los elementos de la matriz de orientación M^i de la fotografía i.

Se va a realizar un ajuste simultáneo por mínimos cuadrados de un bloque fotogramétrico con las ecuaciones de colinealidad, cuya forma es en general, L = F(X), donde:

(x_{ij}, y_{ij}) son los observables (foto-coordenadas medidas)

$X = (X_j, Y_j, Z_j, X^L_i, Y^L_i, Z^L_i, \omega_i, \varphi_i, \chi_i)^T$ son los parámetros (incognitas)

$X_0 = (X^o_j, Y^o_j, Z^o_j, (X^L_i)^o, (Y^L_i)^o, (Z^L_i)^o, \omega_i^0, \varphi_i^0, \chi_i^0)^T$ son los valores aproximados de los parámetros.

La linealización del modelo en un entorno de X_0 produce unas ecuaciones de observación que escribimos en la forma:

$$\dot{A}_{ij}\dot{x}_i + \overline{A}_{ij}\overline{x}_j - t_{ij} = v_{ij}$$

donde:

$\dot{x}_i = (\Delta\omega_i, \Delta\varphi_i, \Delta\chi_i, \Delta X^L_i, \Delta Y^L_i, \Delta Z^L_i)^T$ es el vector de incógnitas constituido por las correcciones a los elementos de orientación exterior.

$\overline{x}_j = (\Delta X_j, \Delta y_j, \Delta z_j)^T$ vector de incógnitas constituido por las correcciones a las coordenadas espaciales del punto j.

$t_{ij} = (x_{ij}^{observ} - F_x(X_0) \;\; y_{ij}^{observ} - F_y(X_0))^T$ vector de constantes de observación, con $(x_{ij}^{observ} \; y_{ij}^{observ})$ vector de observaciones reales y $F_x(X_0)$ $F_y(X_0)$ son los calculados con las ecuaciones de colinealidad para los valores X_0.

$\overline{A}_{ij}$ y $\dot{A}_{ij}$ son las submatrices de la matriz de diseño correspondientes a las incógnitas de los elementos de orientación exterior y a las incógnitas de las coordenadas espaciales respectivamente.

Estas matrices se deducen inmediatamente de la expresión:

$dx^T = - f / m_3 [P\, dR + Q (dX - dX_L)]$, donde:

$\dot{A}_{ij} = - f / m_3 [P, - Q]$ y designando el elemento de la fila k y columna i de la matriz $\dot{A}_{ij}$ simplemente por $\dot{a}_{kl}$ tendremos:

$$\dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} p_{kl,,} si : 1 \le l \le 3..(k = 1,2)$$

$$\dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl,,} si : 4 \le l \le 6..(k = 1,2)$$

En estas expresiones los elementos p_{kl} , q_{kl} y m_3 están evaluados en X_0. Análogamente, la matriz $\overline{A}_{ij}$ viene dada por:

$$\overline{A}_{ij} = \frac{-f}{m_3} Q,, \overline{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl} \ldots k = 1,2 \ldots . l = 1,2,3$$

Y por último: $V_{ij} = (v_{xij}\,,\ v_{yij})$ vector de errores residuales asociado a las observaciones.

Supongamos ahora que el bloque fotogramétrico consta de:

- h fotografías
- n puntos aerotriangulados, de los cuales r tienen apoyo de campo.

Para el punto j designemos por h_j el número de fotografías en las que aparece la imagen de este punto y supongamos además inicialmente que h_j = h para todo j = l….n. Cada una de estas imágenes genera un par de ecuaciones de observación de la forma:

$$\dot{A}_{ij}\,\dot{x}_{\,i} + \overline{A}_{ij}\,\overline{x}_{\,j} - t_{ij} = v_{ij}$$

resulta entonces que el conjunto total de estas ecuaciones asociadas al punto j será:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_{1j} & . & . & 0 \\ & - & & \\ & & & \\ & & - & \\ 0 & & & \dot{A}_{hj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \dot{x}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{A}_{1j} \\ . \\ . \\ . \\ \overline{A}_{hj} \end{bmatrix} \overline{x}_j - \begin{bmatrix} t_{1j} \\ . \\ . \\ . \\ t_{hj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1j} \\ . \\ . \\ . \\ v_{hj} \end{bmatrix}$$

que en forma compacta podemos escribir:

$$\dot{A}_j \dot{x}_j + \overline{A}_j\,\overline{x}_{\,j} - t_j = v_j$$

donde es el vector de correcciones a los elementos de orientación exterior de las h fotografías del bloque.

Los órdenes o dimensiones de las matrices y vectores que intervienen en la expresión anterior son los siguientes:

Dimensión de $\dot{A}_j$ = (2h, 6h)

Dimensión de $\dot{x}_j$ = (6h, 1)

Dimensión de $\overline{A}_j$ = (2h, 3)

Dimensión de $\overline{x}_j$ = (3, 1)

Dimensión de t_j = (2h, 1)

Dimensión de v_j = (2h, 1)

En realidad, cuando h_j < h, que es la situación corriente, el número de ecuaciones del sistema es $2h_j$ y el número de incógnitas asociadas al punto j es $6\,h_j + 3$.

Si consideramos ahora los n puntos, el sistema completo de ecuaciones de observación es:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \dot{A}_n \end{bmatrix} \dot{x} + \begin{bmatrix} \overline{A}_1 & & & \\ & . & & \\ & & . & \\ & & & . \\ & & & \overline{A}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \bar{x}_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_1 \\ . \\ . \\ . \\ t_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ . \\ . \\ . \\ v_n \end{bmatrix}$$

que también podemos escribir en la forma:

$$\bar{x}\ \overline{A}\ +\ \dot{A}\,\dot{x} - t = v$$

donde:

Dimensión de $\dot{A}$ = (2hn, 6h)

Dimensión de $\dot{x}$ = (6h, 1)

Dimensión de $\overline{A}$ = (2hn, 3n)

Dimensión de $\bar{x}$ = (3n, 1)

Dimensión de t = (2hn, 1)

Dimensión de v = (2hn, 1)

En el supuesto de que h_j < h (situación normal), el número total de ecuaciones de observación será:

$$m = 2\sum_{j=1}^{n} h_j$$

El número de incógnitas será 6 h + 3 n (las incógnitas de orientación son las mismas para todos los puntos de una misma fotografía). Si tenemos r puntos de control (las coordenadas se conocen exactamente) el número de incógnitas es:

$$3\,(n - r) + 6\,h$$

En cualquier caso supondremos que el diseño de la aerotriangulación es tal que el número de ecuaciones de observación m, es mayor que el de incógnitas, es decir:

$$m > 3\,(m - r) + 6\,h$$

Todo esto hace que el sistema de ecuaciones de observación no tenga solución exacta y deba procederse a un ajuste por mínimos cuadrados, que conducirá, entre otras cosas, a la mejor

estimación lineal del vector de parámetros que contiene a los elementos de orientación exterior de las fotografías y coordenadas (X, Y, Z) de los (n – r) puntos desconocidos.

Finalmente el sistema de ecuaciones de observación será de la forma:

$$A\,x - t = v$$

donde:

$$A = [\ \dot{A}\quad \overline{A}\ ] \quad y \quad x = [\ \dot{x}\quad \overline{x}\ ]^T$$

Tendremos:

$$\left[\dot{A}\quad \overline{A}\right]\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \overline{x}\end{bmatrix} - [t] = [v]$$

Las dimensiones serán, respectivamente:

$$(2nh\ ,\ 6h + 3n),\ (6h+3n\ ,\ 1),\ (2nh\ ,\ 1)\ y\ (2nh\ ,\ 1)$$

donde h es el número de fotos y n el número de puntos de apoyo.

El sistema de ecuaciones normales, será:

$$\begin{bmatrix}\dot{A}^T\\ \overline{A}^T\end{bmatrix}\left[\dot{A}\quad \overline{A}\right] = \begin{bmatrix}\dot{A}^T\dot{A} & \dot{A}^T\overline{A}\\ \overline{A}^T\dot{A} & \overline{A}^T\overline{A}\end{bmatrix} = [N]$$

Quedando:

$$[N]\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \overline{x}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\acute{A}^T t\\ \overline{A}^T t\end{bmatrix}$$

28. 4. Condición de coplanariedad. Distintos casos de creación analítica de modelos

Supongamos que disponemos de un estereopar de fotografías, donde:

- Sean los centros de exposición L_i y L_j
- Sean R_i y R_j los vectores L_iA y L_jA respectivamente
- Sea B el vector (base) L_iL_j.

Si suponemos que las dos fotografías están orientadas correctamente una con respecto de la otra, de tal forma que se corten todos los rayos homólogos (Orientación relativa), estos tres vectores son coplanarios.

Lo que puede expresarse analíticamente por medio de la ecuación:

$$(R_i \times R_j) * B = 0$$

donde el simbolo 'x' indica producto vectorial y el simbolo '*' indica producto escalar.

El plano definido por estos tres vectores se denomina plano epipolar o nuclear.

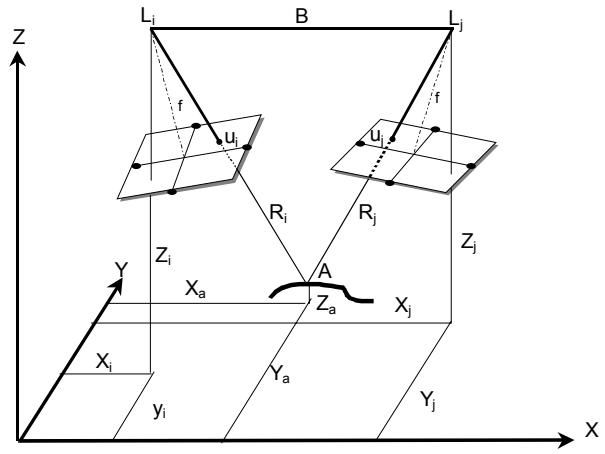


Figura 2.

En el sistema objeto (X Y Z), las componentes de los vectores R_i y R_j son:

$$(X_A - X^L_i,\ Y_A - Y^L_i,\ Z_A - Z^L_i) \text{ y } (X_A - X^L_j,\ Y_A - Y^L_j,\ Z_A - Z^L_j).$$

Por otra parte de la ecuación:

$$x'_a = \lambda_a\ M\,(X_A - X_L)\ ,,\quad \lambda_a \in R$$

se deduce (recordando que la matriz inversa de M es su traspuesta por ser esta una matriz ortogonal) que:

$$R_i = \lambda^{-1}_i\ M^T_i\ x'_i \quad y \quad R_j = \lambda^{-1}_j\ M^T_j\ x'_j$$

donde hemos utilizado para los subíndices (i , j) la notación simplificada:

$$\lambda_i = \lambda_{ai} \quad y \quad x_i' = x'_{ai}$$

Siendo M_i y M_j son las matrices de orientación de las fotografías i y j respectivamente, y los vectores x'_i y x'_j tienen por componentes:

$$x'_I = (x_i, y_i, -f) \quad y \quad x'_j = (x_j, y_j, -f)$$

donde (x_i, y_i) y (x_j, y_j) son las foto-coordenadas de a_i y a_j en los sistemas fiduciales respectivos.

E1 vector B viene dado por $(X^L_j - X^L_i,\ Y^L_j - Y^L_i,\ Z^L_j - Z^L_i)$ y la condición de coplanariedad puede expresarse en la forma:

$$\begin{bmatrix} X^L{}_j - X^L{}_i & Y^L{}_j - Y^L i & Z^L{}_j - Z^L{}_i \\ u_i & v_i & w_i \\ u_j & v_j & w_j \end{bmatrix} = 0$$

siendo (u_i, v_i, w_i) y (u_j, v_j, w_j) las componentes de los vectores $M^T_i\ x'_i$ y $M^T_j\ x'_j$ respectivamente.

La condición de coplanariedad es más complicada que las ecuaciones de colinealidad pues contiene los elementos de orientación exterior de las dos fotografías, pero tiene la ventaja de que

las coordenadas espaciales del punto objeto que ha generado las dos imágenes no intervienen en la ecuación.

La condición de coplanariedad, nos permite efectuar de forma analítica la orientación relativa de un estereopar. Aunque el número de incógnitas que intervienen en las ecuaciones son nueve, se puede como con una adecuada elección del sistema de referencia exterior (que ahora es el sistema de referencia modelo) reducirse a la determinación de cinco incógnitas.

Podemos distinguir dos casos:

Supongamos en primer lugar que el sistema de referencia modelo coincide con el sistema de referencia 3D asociado a la primera fotografía; entonces, $M_i = I_3$, siendo I_3 es la matriz unidad.

Además podemos dividir por una de las incógnitas B_x, B_y o B_z y puesto que la dirección de la base es normalmente próxima a la del eje X modelo, suele elegirse a este fin B_x.

Con todo esto, la condición de coplanariedad se convierte en:

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ x_i & y_i & -f \\ X_j & Y_j & Z_j \end{bmatrix} = 0$$

tal que: $X_j = m_{11}^j x_j + m_{21}^j y_j - f\, m_{31}^j$ analogamente para Y_j y Z_j y donde $\beta_y = B_y / B_x$ y $\beta_z = B_Z / B_x$

Las cinco incógnitas en este modelo funcional de orientación relativa son:

$$(\beta_y,\ \beta_z,\ \omega_j,\ \varphi_j,\ \chi_j)$$

Supongamos en un segundo caso que el eje X del sistema modelo se hace coincidir con la base exactamente y que el eje Y sea paralelo al plano $x_i\ y_i$, queda:

$$B_Y = B_Z = 0 \text{ y } \omega_j = 0$$

Dividiendo de nuevo por B_x la ecuación es ahora:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ X_i & Y_i & Z_i \\ X_j & Y_j & Z_j \end{bmatrix} = 0$$

En esta ecuación intervienen seis incógnitas (los seis elementos de orientación angular de las dos fotografías), pero esto es solo cierto aparentemente, ya que la ecuación anterior puede reducirse a una del tipo de cinco incógnitas, ya que se puede conseguir que ω_j sea nulo.

Veamos para el primer caso, como fácilmente puede deducirse la ecuación de la componente y de la paralaje a partir de las ecuaciones anteriores.

Supongamos, para ello, que los valores de (ω_j, φ_j, χ_j, B_y, B_z) son cantidades pequeñas.

Así, en primer orden de aproximación tenemos:

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ x_i & y_i & -f \\ x_j - \chi_j y_j - \varphi_j f & \chi_j x_j + y_j + f\omega_j & -\varphi_j x_j + \omega_j y_j - f \end{bmatrix} = 0$$

Si efectuamos los cálculos, manteniendo el primer orden de aproximación, obtenemos

$$-f(y_i - y_j) + (f^2 + y_i y_j)\omega_j - y_i x_j \varphi_j + f x_j \chi_j + f(x_i - x_j)\beta_y + (x_i y_j - y_i x_j)\beta_z = 0$$

finalmente:

Consideremos ahora el segundo caso, con $B_Y = B_Z = 0$ y $\omega_j = 0$, tendremos:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ x_i - \chi_i y_i - \varphi_i f & \chi_i x_i + y_i + f\omega_i & -\varphi_i x_i + \omega_i y_i - f \\ x_j - \chi_j y_j - \varphi_j f & \chi_j x_j + y_j & -\varphi_j x_j - f \end{bmatrix} = 0$$

Si efectuamos los cálculos, manteniendo el primer orden de aproximación, obtenemos finalmente:

$$-f(y_i - y_j) - f x_i \chi_i + x_i y_j \phi_i + (-f^2 - y_i y_j)\omega_i + f x_j \chi_j - y_i x_j \varphi_j = 0$$

28.5. Solución de los problemas fotogramétricos de intersección inversa, intersección directa y orientación relativa

Vamos a ver como puede resolverse analíticamente cualquier problema fotogramétrico haciendo uso de las ecuaciones de colinealidad, ya que estas ecuaciones contienen los elementos de orientación exterior e interior, las foto-coordenadas de las imágenes, y las coordenadas espaciales de los puntos objeto.

Esto es lo que justifica la "fuerza" e importancia de las ecuaciones de colinealidad.

Vamos a analizar estos problemas estableciendo en todos los casos el modelo funcional constituido por las ecuaciones de colinealidad, el cual es un modelo explícito en los observables del tipo L = F(X), donde la función vectorial F es no lineal en X.

Para tratar estos problemas, es necesario un vector de valores aproximados de las incógnitas X, en un entorno del cual tengamos las linealizadas las ecuaciones de colinealidad.

Tendremos así un modelo lineal de la forma:

$$A\ x - t = v$$

donde v es el vector de errores residuales asociado a las observaciones, A la matriz de diseño, x el vector de incógnitas, constituido por las correcciones a aplicar a los valores aproximados de las incógnitas del problema, y t el vector de constantes de observación.

Intersección inversa fotogramétrica

En este problema se quiere determinar los elementos de orientación exterior de una fotografía a partir del conocimiento de las foto-coordenadas de las imágenes de al menos tres puntos de control.

Las incógnitas son seis (X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ , χ) y dado que cada punto de control genera un par de ecuaciones de colinealidad, serán por tanto tres el número mínimo de puntos de control a utilizar.

En este caso, la estructura típica de las ecuaciones de observación asociadas al punto j es:

$$\dot{A}_j \dot{x} - t_j = v_j \quad (j = 1,..., m)$$

donde $m > 3$ es el número de puntos de control observados.

Tenemos:

$$\dot{x} = (\Delta\omega,\ \Delta\varphi,\ \Delta\chi,\ \Delta X_L,\ \Delta Y_L,\ \Delta Z_L)^T$$

$$t_j = ((x_j^{obsev} - F_x(\omega^0,\varphi^0,\chi^0,X^0_L,Y^0_L,Z^0_L;X_j,Y_j,Z_j),(y_j^{obsev} - F_y(\omega^0,\varphi^0,\chi^0,X^0_L,Y^0_L,Z^0_L;X_j,Y_j,Z_j))^T$$

$$v_j = (v_x, v_y)^T$$

siendo x_j^{observ}, y_j^{observ} las foto-coordenadas medidas de las imágenes del punto de control j de coordenadas espaciales (X_j, Y_j, Z_j) y $(\omega^0, \varphi^0, \chi^0, X^0_L, Y^0_L, Z^0_L)$ son los valores aproximados de los elementos de orientación externa de la fotografía y a los que aplicando las ecuaciones de colinealidad F_x, y F_y, es decir: $F(X) = (F_x(X), F_y(X))$ obtenemos valores calculados aproximados de las foto-coordenadas.

La matriz de diseño $\dot{A}_j$ se obtiene de las ecuaciones linealizadas y si designamos por a_{kl} el elemento (k, l) de esta matriz, tendremos:

$$\dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl},, l = 4,5,6,, k = 1,2 \qquad \dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} p_{kl},, l = 1,2,3,, k = 1,2$$

La determinación numérica de estos elementos se hace en base a los valores aproximados de los elementos de orientación exterior de la fotografía y de los valores de las coordenadas espaciales conocidas del punto j.

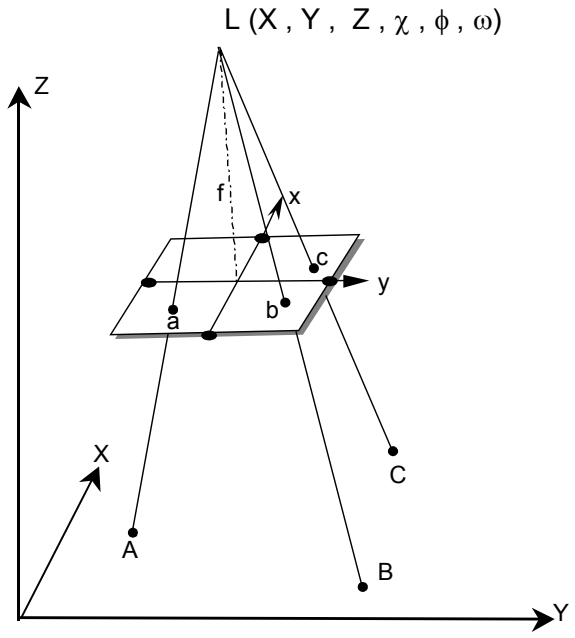


Figura 3.

El sistema global de ecuaciones de observación es del tipo:

$$A\,x - t = v$$

Con 2 m ecuaciones y seis incógnitas.

$$A = \begin{bmatrix} Á_1 \\ . \\ . \\ . \\ Á_m \end{bmatrix} \qquad x = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ .\Delta\varphi \\ . \\ .\Delta Y_L \\ \Delta Z_L \end{bmatrix} \qquad t = \begin{bmatrix} t_1 \\ . \\ . \\ . \\ t_m \end{bmatrix} \qquad v = \begin{bmatrix} v_1 \\ . \\ . \\ . \\ v_m \end{bmatrix}$$

Las dimensiones de las matrices, son:

$$\text{Dimensión de } (A) = (2m,6)$$

$$\text{Dimensión de } (x) = (6,1)$$

$$\text{Dimensión de } (\mathrm{t}) = \text{ Dimensión de } (\mathrm{v}) = (2m,1)$$

Intersección directa fotogramétrica

En este caso disponemos de un estéreopar fotogramétrico y suponemos conocidos los elementos de orientación exterior de las dos fotografías.

Los datos de partida, son:

$$(\omega_i,\ \phi_i,\ \chi_i,\ X_i^L, Y_i^L, Z_i^L\ ;\ i = 1, 2)$$

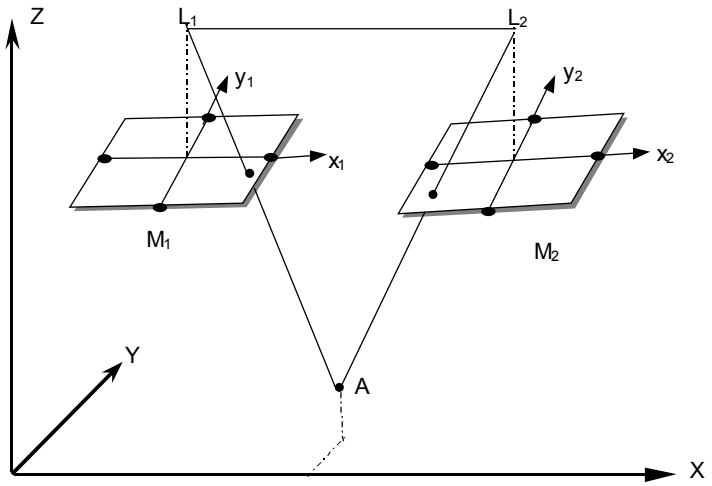


Figura 4.

Y queremos que a partir de las foto-coordenadas (x_i, y_i) medidas en las dos imágenes del punto A en cada fotografía, poder determinar las coordenadas espaciales (X, Y, Z) del punto A.
Tenemos un problema sobredeterminado, pues cada imagen genera un par de ecuaciones de observación (en total cuatro), mientras que el número de incógnitas es tres.
Para la fotografía i tenemos las siguientes ecuaciones de observación:

$$\overline{A}_i\ \bar{x} - t_i = v_i$$

donde:

$\bar{x} = (\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A)^T$ siendo la dimensión de $\overline{A}_i$ de (2,3)

$t_i = (x_i^{obsev} - F_x(\omega_i,\varphi_i,\chi_i,X_i^L,Y_i^L,Z_i^L;X^0_A,Y^0_A,Z^0_A),\ y_i^{obsev} - F_y(\omega_i,\varphi_i,\chi_i,X_i^L,Y_i^L,Z_i^L;X^0_A,Y^0_A,Z^0_A))^T$

$v_j = (v_{xi},\ v_{yi})^T$

Si al elemento (k , l) de la matriz $\overline{A}$ lo designamos por a_{kl}, según:

$$dx = -f\ /\ m_3\ [P\ dR\ +\ Q\ (dX - dX_L)]$$

entonces vendrá dado por:

$$\bar{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl},,,l = 1,2,3,,k = 1,2$$

Estos elementos se calculan por medio de los elementos de orientación exterior de la fotografía i, y los valores aproximados de las coordenadas espaciales del punto A.

El sistema global del sistema de ecuaciones de observación es ahora:

$$\begin{bmatrix} \overline{A}_1 \\ \overline{A}_2 \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

De dimensiones, para m puntos: (4m, 3m), (3m, 1) y (4m, 1) respectivamente

Como es necesario obtener valores aproximados de las coordenadas espaciales del punto A, veamos ahora como se pueden calcular dichos valores aproximados. En el apartado anterior, teníamos que:

$$R_i = \lambda^{-1}{}_i \; M^T{}_i \; x'_i$$

haciendo:

$R_i = (X_A - X_1^L)$ y $\lambda^{-1}{}_i = \boldsymbol{\mu}_1$ y análogamente $R_j = (X_A - X_2^L)$ y $\lambda^{-1}{}_j = \boldsymbol{\mu}_2$ queda:

$$(X_A - X_1^L) = \boldsymbol{\mu}_1 \; M_1^T \; x_1'$$

$$(X_A - X_2^L) = \boldsymbol{\mu}_2 \; M_2^T \; x_2'$$

de donde se deduce que:

$$X_1^L + \boldsymbol{\mu}_1 \; M_1^T x_1' = X_2^L + \boldsymbol{\mu}_2 \; M_2^T x_2'$$

Haciendo uso de nuevo de la notación:

$$U_1 = (u_1, \; v_1, \; w_1) = M_1^T \; x_i' \quad ,, \quad (i = 1 \; , 2)$$

tenemos que:

$$X_1^L + \boldsymbol{\mu}_1 \; u_1 = X_2^L + \boldsymbol{\mu}_2 \; u_2$$

$$Y_1^L + \boldsymbol{\mu}_1 \; v_1 = Y_2^L + \boldsymbol{\mu}_2 \; v_2$$

$$Z_1^L + \boldsymbol{\mu}_1 \; w_1 = Z_2^L + \boldsymbol{\mu}_2 \; w_2$$

De las dos primeras ecuaciones obtenemos $\boldsymbol{\mu}_2$ en la forma:

$$\mu_2 = \frac{(X_1^L - X_2^L)v_1 + (Y_2^L - Y_1^L)u_1}{u_2 v_1 - u_1 v_2}$$

Finalmente, con este valor de $\boldsymbol{\mu}_2$ obtenido, sustituyendo en:

$$(X_A - X_2^L) = \boldsymbol{\mu}_2 \; M_2^T \; x_2'$$

deducimos un valor aproximado de X_A^o.

Orientación relativa

Fijemos la fotografía 1 de tal forma que los parámetros angulares cumplan que:

$$\omega_1 = \varphi_1 = \chi_1 = 0$$

y las coordenadas del centro de proyección cumplan también que:

$$X_1^L = Y_1^L = Z_1^L = 0$$

esto equivale a que el sistema de referencia modelo coincide con el sistema imagen asociado a la primera fotografía.

Fijemos también X_2^L el problema es entonces determinar la posición y orientación de la segunda fotografía con respecto a la primera, de tal forma que los pares de rayos homólogos se corten en el espacio modelo.

Antes resolvimos este problema por medio de la condición de coplanariedad, vamos a ver que las ecuaciones de colinealidad también lo resuelven imponiendo que en las ecuaciones asociadas a las imágenes a_{1j} y a_{2j}, intervengan las coordenadas modelo de un mismo punto j, que de forma indirecta presupone que las rectas L_1a_{1j} y L_2a_{2j} se cortan en j.

Obviamente las coordenadas de j no son conocidas y se añaden como incógnitas adicionales. También en este caso es suficiente considerar al menos cinco puntos homólogos, resultando entonces un total de 20 ecuaciones para 20 incógnitas (los cinco elementos desconocidos de orientación exterior de la segunda fotografía y las 15 (3 x 5) coordenadas modelo de los puntos j).

Veamos la estructura del sistema de ecuaciones de observación, para lo cual vamos a considerar las imágenes de los puntos j = l…. en las fotografías i, para i = 1, 2

Para i = l (foto fija con $M_1 = I_3$), tenemos:

$$\overline{A}_{1j}\ \overline{x}_j - t_{1j} = v_{1j}$$

donde la dimensión de $\overline{A}$ es igual a (2 , 3) y siendo el vector $\overline{x}_j = (\Delta X_j,\ \Delta Y_j,\ \Delta Z_j)^T$

Si al elemento (k , l) de la matriz $\overline{A}$ lo designamos por a_{kl}, según:

$$dx = -f / m_3\ [P\ dR + Q\ (dX - dX_L)]$$

entonces vendrá dado por:

$$\overline{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl},,, l = 1,2,3,, k = 1,2$$

$t_{ij} = (x_{ij}^{obsev} - F_x(0 ; X_j^0 , Y_j^0 , Z_j^0);\ y_{ij}^{obsev} - F_y(0; X_j^0 , Y_j^0 , Z_j^0))^T$ y $v_{ij} = (v_{xij} , v_{yij})^T$

Para i=2 (la foto i = 2 está orientada respecto a la foto i = 1), tenemos:

$$\dot{A}_{2j}\dot{x}_2 + \overline{A}_{2j}\overline{x}_j - t_{2j} = v_{2j}$$

donde la dimensión de la matriz $\dot{A}_{2j}$ es (2 , 5) y los elementos de dicha matriz, vendrán dados por:

$$\dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} p_{ki,,i\,=\,1,2,3,,k\,=\,1,2} \qquad \text{y} \qquad \dot{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{k,i\,+\,1,,i\,=\,4,5,,k\,=\,1,2}$$

La dimensión de la matriz $\overline{A}_{2j}$ es (2 , 3) y cada elemento de dicha matriz, será de la forma:

$$\overline{a}_{kl} = \frac{-f}{m_3} q_{kl,,,l=1,2,3,,k=1,2}$$

y donde el resto de las matrices, son:

$\overline{x}_j = (\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j)^T$

$\dot{x}_2 = (\Delta\omega_2, \Delta\varphi_2, \Delta\chi_2, \Delta Y_2^L, \Delta Z_2^L)^T$

$t_{2j} = (x_{2j}^{obsev.} - F_x(\omega_2^0, \varphi_2^0, \chi_2^0, X_2^L, (Y_2^L)^0, (Z_2^L)^0; X_j^0, Y_j^0, Z_j^0),$

$(y_{2j}^{obsev.} - F_y(\omega_2^0, \varphi_2^0, \chi_2^0, X_2^L, (Y_2^L)^0, (Z_2^L)^0; X_j^0, Y_j^0, Z_j^0))^T$

$v_{2j} = (v_{x2j}, v_{y2j})^T$

En definitiva, las ecuaciones de observación para el punto j son:

$$\begin{bmatrix} 0_{2x5} \\ \dot{A}_{2j} \end{bmatrix} \dot{x}_2 + \begin{bmatrix} \overline{A}_{1j} \\ \overline{A}_{2j} \end{bmatrix} \overline{x}_j - \begin{bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ij} \\ v_{2j} \end{bmatrix}$$

y el sistema total de ecuaciones de observación con la notación implícita indicada en la expresión anterior es:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \dot{A}_m \end{bmatrix} \dot{x}_2 + \begin{bmatrix} \overline{A}_1 & & & \\ & . & & \\ & & . & \\ & & & \overline{A}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{x}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \overline{x}_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_1 \\ . \\ . \\ . \\ t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ . \\ . \\ . \\ v_m \end{bmatrix}$$

donde el número total de ecuaciones es 4 m y el número de incógnitas es 5 + 3 m.

Bibliografía

[1] Brandtatter, G., Otero, J., Romero, P. y Sevilla, M. VI Curso de Geodesia Superior, pág.109-122

[2] Ghosh, S. Analitical Photogrammetry. Pergamon Press 1988

[3] Kraus, K. Photogrammetry Vol 1.Dummiers Verlag. Bonn 1993

[4] Kraus, K. Photogrammetry Vol 2.Dummiers Verlag. Bonn 1996

[5] Slama, Ch., Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry 1980

Tema 29. Aerotriangulación analítica. Definición de aerotriangulación, diseño de bloques de aerotriangulación. Métodos de compensación de bloques de aerotriangulación. Ajuste de modelos independientes. Compensación por el método de haces. Modelo funcional, modelo estocástico y modelo matemático del ajuste de haces. Aplicaciones, ventajas y desventajas del método de haces

29.1. Definición de aerotriangulación

Aerotriangulación es el termino que se utiliza para describir el proceso de cálculo de coordenadas X, Y, Z (en un sistema de referencia local) de puntos y accidentes del terreno basadas en medidas realizadas sobre bloques de fotogramas. Fototriangulación es un término más general que abarca su aplicación tanto a fotogramas terrestres como aéreos (Wolf, 1983). La técnica de **Aerotriangulación** además de la fase de medida de fotocoordenadas (x, y) de puntos, definidos en el proyecto, incluye la fase de ajuste y compensación en bloque de esas medidas, con el objetivo de densificar el control terreno que permite la orientación estereoscópica en los procesos de restitución, obtención de Modelos Digitales de Elevaciones, generación de ortofotos entre otras aplicaciones cartográficas.

La aplicación más importante de la aerotriangulación es determinar **puntos de control o apoyo,** por medio de bandas o bloque de fotogramas, para su posterior aplicación en los procesos fotogramétricos, evitando en todo momento el levantamiento exhaustivo de puntos de campo.

Una **primera clasificación de métodos de aerotriangulación** tiene en cuenta el tipo de instrumental y método de medida seguido; según este planteamiento los métodos pueden ser **analógico** (realizado con instrumental analógico y reconstruyendo todas las fases de la aerotriangulación de forma analógica, medida y formación del modelo analógica, así como la formación de la banda etc.), **semianalítico** donde comenzamos las medidas y formación de modelos con métodos analógicos y en las fases posteriores utilizaremos procedimientos numéricos, y analítico al que se referirá todo el tema de exposición.

En el **método analítico** los observables básicos son las medidas de fotocoordenadas (x, y) de puntos determinados del fotograma (medidos con monocomparadores, estéreocomparadores o

con restituidores analíticos) que configuran la red de puntos de control menor, o canevás de aerotriangulación, con respecto a un sistema terrestre de referencia.

29.2. Diseño de bloques de aerotriangulación

En el diseño de un bloque de aerotriangulación, los puntos podemos definirlos como **puntos de paso** (puntos transferidos, mediante un equipo transferidor y marcador de puntos de paso que permiten conectar los diferentes modelos formando bandas continuas**), puntos de enlace** (puntos transferidos que unen bandas contiguas) y **puntos de control**. A su vez los puntos de control pueden ser **puntos preseñalizados** en el terreno antes del vuelo, utilizados en pruebas y test fotogramétricos, **puntos pinchados en campo sobre el fotograma** (puntos de apoyo) y croquizados para su interpretación en la fase de medida.

<table>
<tr><td rowspan="4"></td><td>Modelos</td><td>Formación Pasada</td><td>Ajuste Pasada</td><td>Ajuste Bloque Pasadas</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Fotogramas

Coordenadas</td><td>Modelos</td><td>Formación Pasada</td><td colspan="2">Ajuste Bloque por Pasadas</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Comparador</td><td>Modelos</td><td colspan="3">Ajuste Bloque por Modelos Independientes</td></tr>
<tr><td colspan="4">Ajuste Simultáneo o Método de HACES</td></tr>
</table>

Tabla 1. Método Analítico

La exactitud de la medida de estos puntos viene afectada por el tipo de punto medido (natural, marcado artificial, o preseñalizado). La exactitud del equipo de medida instrumental normalmente no resulta crítica en la práctica, los estéreocomparadores proporcionan una exactitud del orden de 5 μm a 10 μm a la escala del fotograma, mientras los comparadores utilizados en fotogrametría garantizan una exactitud de 1 μm a 3 μm. Igualmente bajo adecuadas circunstancias los restituidores analíticos pueden conseguir idénticas precisiones. Las

mejores exactitudes se consiguen cuando todos los puntos medidos están señalizados en el terreno antes del vuelo, aunque el procedimiento es bastante caro y consume tiempo de trabajo en el campo y mantenimiento.

Normalmente los más utilizados son los puntos naturales, sin embargo no hay muchas publicaciones sobre la precisión de estos puntos. Este tipo de puntos es utilizado principalmente, dando gran exactitud en levantamientos de grandes escalas fotográficas, en áreas urbanas donde los detalles son interpretados fácilmente. Por otro lado este mismo tipo de puntos a escalas medias y pequeñas presentan más dificultades. Los **puntos de paso marcados artificialmente** son los más ampliamente utilizados en fotogrametría para aplicaciones de cartografía topográfica. Resulta evidente que las precisiones obtenidas son inferiores a las conseguidas con puntos preseñalizados pero no muy inferiores.

El tamaño de los puntos artificiales marcados con equipos transferidores de puntos varía según el tipo de instrumento usado y son del orden de 40 μm a 100 μm. Los mejores aparatos transferidores de puntos actualmente son de tecnología láser. Entre estos equipos podemos señalar los más utilizados el Kern (Leica) CPM 1 que combina un transferidor de puntos y monocomparador en el mismo aparato, realiza las dos tareas simultáneamente. En el proceso de transferencia, una diapositiva sobre la que un punto de paso va a ser transferido, se coloca sobre el dispositivo marcador y las demás diapositivas a las que se va a transferir el mismo punto se observa estereoscópicamente marcándose a continuación el punto correspondiente. La figura 1 muestra el procedimiento de transferencia.

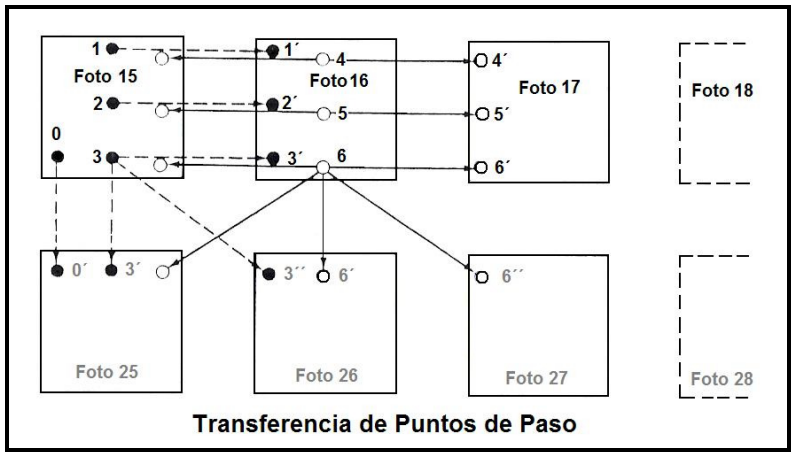


Figura 1. Transferencia de puntos de paso

Es posible utilizar restituidores analíticos en la transferencia numérica de puntos de paso y eliminar de esta manera el marcado de puntos. Esto es posible en los actuales equipos

restituidores analíticos pero en las fases posteriores como la orientación absoluta de los modelos son necesarios los puntos marcados. En la aerotriangulación analítica cada fotograma tiene marcados normalmente, como hemos mostrado, tres puntos de paso seleccionados de tal forma que sus imágenes estén a lo largo del eje fiducial según aparecen en la figura, de acuerdo con esta distribución obtendríamos seis puntos de paso por modelo y nueve por fotograma aislado

MÉTODO DE MODELOS INDEPENDIENTES (la unidad básica de trabajo es un modelo) en este ajuste todos los modelos del bloque fotogramétrico se orientan previamente de forma relativa. El resultado es una serie de modelos independientes cada uno en su propio sistema de coordenadas y su propia escala. Utilizando los puntos de paso, enlace y los puntos de control, por medio de transformaciones de semejanza *Helmert*, se obtiene en una segunda etapa la orientación absoluta simultánea de todos los modelos. Un dibujo de la distribución de puntos de control y de paso se muestra en la siguiente figura 2.

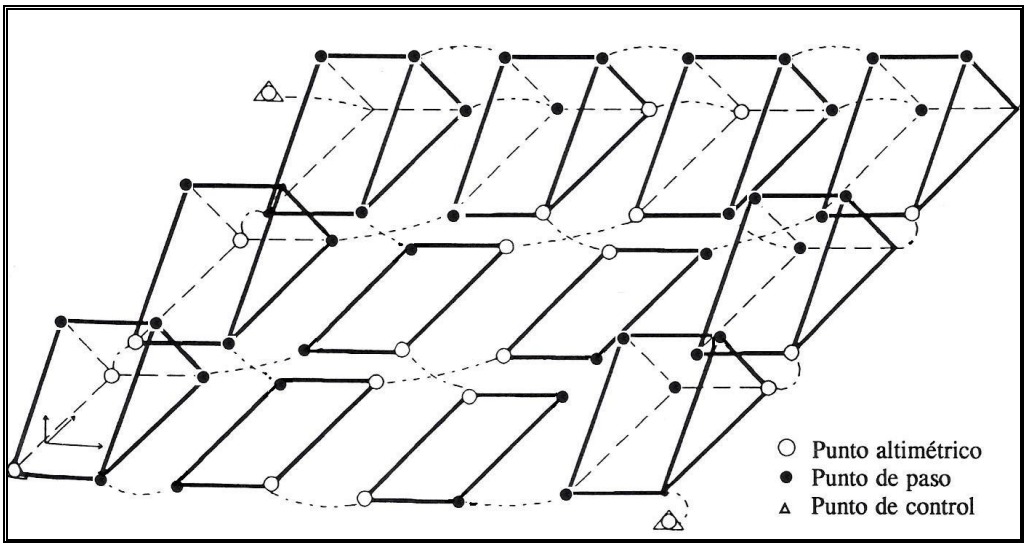


Figura 2. Distribución de puntos de control y de paso

La primera fase del ajuste por modelos independientes de un bloque de aerotriangulación comienza con el cálculo de coordenadas modelo mediante una orientación relativa numérica. Durante el ajuste los modelos individuales son tratados como un bloque único y transformados simultáneamente, por el método de los mínimos cuadrados en el sistema terreno. El modelo estéreo es la unidad básica de la triangulación aérea en modelos independientes.

Se aplican distintas metodologías de compensación, una de las más extendidas es la compensación de cálculo denominada 4-3, primero se ajusta la planimetría mediante una transformación conforme plana (*Helmert)* y luego se procede a la compensación altimétrica. O bien el ajuste de los siete parámetros de la orientación absoluta simultáneamente.

29.3. Ajuste de bloque espacial por modelos independientes

En un ajuste del bloque espacial calculamos las coordenadas XYZ de los puntos de paso conjuntamente en el sistema de coordenadas terreno. Como dato inicial contamos con las coordenadas modelo x, y, z de puntos del modelo formado por orientación relativa. Además de las coordenadas modelo de los puntos de control y los puntos de paso introducimos las coordenadas de los centros proyectivos obtenidos de la orientación relativa numérica y la formación del modelo.

Los centros proyectivos estabilizan las altitudes a lo largo de la pasada, como una estabilización similar perpendicular a la pasada no es posible se colocan cadenas de puntos de control perpendiculares a la pasada. Una muy buena estabilización perpendicular de altitudes en el bloque se puede conseguir con solapes entre pasadas del 60%.

El principio del ajuste de bloque espacial puede verse en la figura anterior. Los puntos en cada modelo son definidos en un sistema de coordenadas espacial independiente, y pueden ser transformados al sistema terreno aplicando siete parámetros de orientación absoluta. Para la orientación absoluta simultanea de todos los modelos del bloque, tenemos por un lado las coordenadas modelo de los puntos de paso (incluidos los centros proyectivos) y por otro lado las coordenadas modelo y terreno de los puntos de control.

El ajuste se define como sigue, los modelos son:

- Desplazados (tres traslaciones X_0,Y_0,Z_0)
- Rotados (tres rotaciones Ω, Φ, K)
- Escalados (con factor de escala λ)

Los puntos de paso (incluidos los centros proyectivos) se ajustan todo lo posible, de modo que las discrepancias de los residuales de los puntos de control y de paso sean lo más pequeños posibles.

29.3.1. Modelo matemático

Para conseguir por ajuste simultáneo la orientación absoluta de todos los modelos del bloque se aplica como proceso estándar una transformación de semejanza espacial a cada modelo independiente.

Supongamos un punto de control terreno i medido en el modelo j (con un sistema arbitrario de coordenadas) la relación entre las coordenadas modelo (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) y las coordenadas terreno (X_i,Y_i, Z_i) viene dada por la expresión matricial

$$\begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix} = (1 + \lambda_j)\ R_j \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{vmatrix}$$

Donde: $(1+\lambda_j)$ es el factor de escala, R_j es una matriz ortogonal de tres dimensiones y los incrementos de X, Y, Z son las traslaciones en las direcciones de los ejes cartesianos. En este caso se recomienda utilizar como matriz ortogonal de entre las posibles la denominada matriz de Rodríguez, ya que no son necesarias las funciones trigonométricas, la matriz se obtiene desarrollando la expresión de Cayley-Rodriguez

$$R = (I - S)\cdot(I + S)^{-1} \qquad \text{siendo} \qquad S = \frac{1}{2}\cdot\begin{vmatrix} 0 & c & -b \\ -c & 0 & a \\ b & -a & 0 \end{vmatrix}$$

S es una matriz antisimétrica, I es la matriz Identidad,

$$I - S = \begin{vmatrix} 1 & \frac{-c}{2} & \frac{b}{2} \\ \frac{c}{2} & 1 & \frac{-a}{2} \\ \frac{-b}{2} & \frac{a}{2} & 1 \end{vmatrix}; \qquad I + S = \begin{vmatrix} 1 & \frac{c}{2} & \frac{-b}{2} \\ \frac{-c}{2} & 1 & \frac{a}{2} \\ \frac{b}{2} & \frac{-a}{2} & 1 \end{vmatrix}$$

$$\det(I + S) = 1 + \frac{a^2 + b^2 + c^2}{4}$$

$$(I + S)^{-1} = \frac{1}{1 + \frac{a^2 + b^2 + c^2}{4}}\cdot\begin{vmatrix} 4 + a^2 & ab - 2c & ac + 2b \\ ab + 2c & 4 + b^2 & bc - 2a \\ ac - 2b & bc + 2a & 4 + c^2 \end{vmatrix}$$

Obteniéndose finalmente la expresión de la Matriz de Rodríguez

$$R = \frac{1}{1+(a^2+b^2+c^2)/4}\begin{vmatrix} 1+(a^2-b^2-c^2)/4 & -c+ab/2 & b+ac/2 \\ c+ab/2 & 1+(-a^2+b^2-c^2)/4 & -a+bc/2 \\ -b+ac/2 & a+bc/2 & 1+(-a^2-b^2+c^2)/4 \end{vmatrix}$$

En los casos que las cantidades lineales son pequeñas a, b, c coinciden con los valores angulares ω, ϕ, κ. En estos casos de pequeños ángulos se obtiene la denominada matriz reducida

$$R_{\omega\varphi\kappa} \approx \begin{vmatrix} 1 & -c & b \\ c & 1 & -a \\ -b & a & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -\Delta k & \Delta\varphi \\ \Delta k & 1 & -\Delta\omega \\ -\Delta\varphi & \Delta\omega & 1 \end{vmatrix}$$

La ecuación matricial es la base para la definición de modelo funcional F que relaciona los siete parámetros de transformación (λ, ω, φ, κ, ΔX, ΔY, ΔZ) con las medidas modelo (observaciones) (x_{ij},y_{ij},z_{ij}) y terreno en la forma

$$\begin{vmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{vmatrix} = (1+\lambda_j)\ R_j \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix}$$

(1)

Estas ecuaciones son no lineales, así que procederemos a su linealización, cada ecuación se escribirá aplicando Taylor para cada coordenada como sigue

$$F = F_0 + \frac{\partial F}{\partial X_0} d X_0 + \frac{\partial F}{\partial Y_0} d Y_0 + \frac{\partial F}{\partial Z_0} d Z_0 + \frac{\partial F}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial F}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa$$

Obteniéndose las respectivas funciones (F_x, F_y, F_z) y sustituyendo por las respectivas derivadas parciales obtendríamos el sistema de ecuaciones de observación

$$\nu = A\ x - l$$

La matriz de diseño toma la forma siguiente para un punto i en el modelo j

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_x}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \phi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_y}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \phi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_z}{\partial X_0} & \frac{\partial F_z}{\partial Y_0} & \frac{\partial F_z}{\partial Z_0} & \frac{\partial F_z}{\partial \lambda} & \frac{\partial F_z}{\partial \omega} & \frac{\partial F_z}{\partial \phi} & \frac{\partial F_z}{\partial \kappa} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \\ d\lambda \\ d\omega \\ d\phi \\ d\kappa \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} x_{ij} - X_i \\ y_{ij} - Y_i \\ z_{ij} - Z_i \end{vmatrix}$$

En la evaluación de las derivadas parciales para la linealización podemos aproximar y considerar la matriz de Rodríguez ortogonal en la forma reducida como

$$R = \begin{vmatrix} 1 & -c & b \\ c & 1 & -a \\ -b & a & 1 \end{vmatrix}$$

Entonces tenemos que las respectivas derivadas parciales son

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} \quad ; \quad \frac{\partial F}{\partial a} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} \quad ; \quad \frac{\partial F}{\partial c} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial F}{\partial X_0} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad ; \quad \frac{\partial F}{\partial Y_0} = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad ; \quad \frac{\partial F}{\partial Z_0} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

sustituyendo obtenemos las ecuaciones en expresión algebraica

$$\begin{aligned} X_i &= dX_j + x_{ij}\, d\lambda_j + z_{ij}\, db_j - y_{ij}\, dc_j + x_{ij} \\ Y_i &= dY_j + y_{ij}\, d\lambda_j - z_{ij}\, da_j + x_{ij}\, dc_j + y_{ij} \\ Z_i &= dZ_j + z_{ij}\, d\lambda_j + y_{ij}\, da_j - x_{ij}\, db_j + x_{ij} \end{aligned}$$

Aparecen las siete incógnitas de la orientación absoluta, escribimos nuevamente las ecuaciones para la estimación mínimos cuadrados por observaciones indirectas

$$\nu_x = dX_j + x_{ij}\, d\lambda + z_{ij}\, db - y_{ij}\, dc - (X_i - x_{ij})$$
$$\nu_y = dY_j + y_{ij}\, d\lambda - z_{ij}\, da + x_{ij}\, dc - (Y_i - y_{ij})$$
$$\nu_z = dZ_j + z_{ij}\, d\lambda + y_{ij}\, da - x_{ij}\, db - (Z_i - z_{ij})$$

En forma matricial las ecuaciones de errores son

$$\begin{vmatrix} \nu_{x_{ij}} \\ \nu_{y_{ij}} \\ \nu_{z_{ij}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{ij} & 0 & z_{ij} & -y_{ij} \\ 0 & 1 & 0 & y_{ij} & -z_{ij} & 0 & -x_{ij} \\ 0 & 0 & 1 & z_{ij} & y_{ij} & -x_{ij} & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} dX_j \\ dY_j \\ dZ_j \\ dl_j \\ da_j \\ db_j \\ dc_j \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix}$$

En notación matricial reducida, como hemos adelantado, estas ecuaciones son como

$$\nu = A\ x - l$$

Cada punto de control proporciona tres ecuaciones de observación. La solución del sistema completo lo obtenemos por estimación mínimos cuadrados por observaciones indirectas. Las ecuaciones planteadas son evaluadas para todos los modelos y los centros perspectivos; normalmente, todas las coordenadas modelo son tratadas como observaciones incorreladas con diferentes pesos, definiendo un modelo estocástico. Las ecuaciones normales y su solución es

$$A^T\ P\ A\ \hat{x} = A^T\ P\ l; \qquad \hat{x} = (A^T\ P\ A)^{-1}\ A^T\ P\ l$$

Considerando un bloque de m modelos y n puntos de control terreno, el ajuste del bloque tendrá 7 m incógnitas de los parámetros de transformación más 3 n incógnitas de las coordenadas terreno de los puntos de paso, además de las 3 m coordenadas de los centros proyectivos.

En general el control terreno disponible no está exento de error y como consecuencia, los puntos de control terrestre son tratados como observaciones. Si tenemos un punto de control i, en planimetría y altimetría, podemos plantear dos ecuaciones de observación adicionales escribiendo

$$\begin{vmatrix} \nu_{X_{it}} \\ \nu_{Y_{it}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_{it} \\ Y_{it} \end{vmatrix} \quad \text{planimetría}$$

$$\nu_{Z_{it}} = Z_i - Z_{it} \quad \text{altimetría}$$

Donde los residuales son los correspondientes a los puntos de control a los que se les asigna un peso según su exactitud. A un punto fijo se le asigna peso infinito, peso cero será un punto considerado de chequeo.

La solución de sistema de observaciones planteado proporciona los siete parámetros buscados para cada modelo independiente (λ_j, a_j, b_j, c_j, dX_j, dY_j, dZ_j).

El sistema planteado al ser un sistema de observaciones no lineal necesita cálculo iterativo una vez normalizado, obteniéndose finalmente los parámetros y transformaciones de las coordenadas de los puntos. En cada iteración se calculan las correcciones de las distintas incógnitas del ajuste, normalmente un bloque necesita de 2 o 3 iteraciones, las coordenadas terreno transformadas finales son calculadas después de la última iteración. Programas contrastados de este tipo encontramos SPACE-M (Blais, 1973), XYZBLC (Bervoets), ALBANY (Eiro, 1975).

29.3.2 Método de modelos independientes PATM-43

Aquí los siete parámetros de transformación se dividen en dos grupos de 4 y 3 parámetros. En la iteración planimétrica, por la que comienza el cálculo, se determinan los parámetros λ_j, c_j, Δx_j, Δy_j de las ecuaciones de observación a partir de las coordenadas modelo (x,y) y de los puntos de control. Si despreciamos los parámetros a y b (a=0, b=0, Δz_j en la **matriz de Rodríguez**, λ y c se reemplazan por nuevos parámetros

Considerando a=0, b=0, Δz_j nos queda

$$R = \frac{1}{1+\frac{a^2+b^2+c^2}{4}} \begin{vmatrix} 1+\frac{a^2-b^2-c^2}{4} & -c+\frac{ab}{2} & b+\frac{ac}{2} \\ c+\frac{ab}{2} & 1+\frac{-a^2+b^2-c^2}{4} & -a+\frac{bc}{2} \\ -b+\frac{ac}{2} & a+\frac{bc}{2} & 1+\frac{-a^2-b^2+c^2}{4} \end{vmatrix}$$

$$R = \frac{1}{1+\frac{c^2}{4}} \begin{vmatrix} 1-\frac{c^2}{4} & -c & 0 \\ c & 1-\frac{c^2}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 1+\frac{c^2}{4} \end{vmatrix}$$

Introduciendo el elemento exterior y multiplicando por el factor de escala queda

$$R = \begin{vmatrix} \frac{\lambda(1-c^2/4)}{1+c^2/4} & \frac{-\lambda c}{1+c^2/4} & 0 \\ \frac{\lambda c}{1+c^2/4} & \frac{\lambda(1-c^2/4)}{1+c^2/4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\lambda(1+c^2/4)}{1+c^2/4} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d & -e & 0 \\ e & d & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{vmatrix}$$

Además tenemos que

$$d = \frac{\lambda(1-c^2/4)}{(1+c^2/4)} \quad ; \quad e = \frac{\lambda c}{(1+c^2/4)}$$

Se comprueba que $\lambda^2=(d^2+c^2)$; además $c=2(\lambda-d)/e$ y también $c= 2e/\lambda+d$

Las ecuaciones de observación no lineales de la transformación de semejanza tridimensional se transforman en un sistema lineal, obteniendo

$$\begin{vmatrix} \nu_{x_{ij}} \\ \nu_{y_{ij}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & x_{ij} & -y_{ij} \\ 0 & 1 & y_{ij} & x_{ij} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ d_j \\ e_j \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \end{vmatrix}$$

Estas ecuaciones se escriben para los puntos modelo no para los centros perspectivos, no se utilizan en este paso. Las ecuaciones se escriben para los puntos de control

$$\begin{vmatrix} \nu_{x_{it}} \\ \nu_{y_{it}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_{it} \\ Y_{it} \end{vmatrix} \quad \text{planimetría}$$

La solución del sistema da los parámetros d, e, ΔX e ΔY para todos los modelos y, seguidamente, se determinan λ y c de las expresiones

$$\lambda = \sqrt{d^2 + e^2}$$
$$c = 2(\lambda - d)/e$$

A continuación se plantea el ajuste altimétrico, donde se determinarán los parámetros a, b e ΔZ, obteniéndose las siguientes ecuaciones de observación para los puntos de modelo y centros perspectivos

$$\upsilon_{z_{ij}} = \begin{bmatrix} y_{ij} & -x_{ij} & 1 \end{bmatrix} \begin{vmatrix} a_j \\ b_j \\ \Delta Z_j \end{vmatrix} + \left(z_{ij} - Z_i \right) \text{ puntos modelo i en el modelo j}$$

$$\begin{vmatrix} \upsilon_{x_{ij}} \\ \upsilon_{y_{ij}} \\ \upsilon_{z_{ij}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & z_{ij} & 0 \\ -z_{ij} & 0 & 0 \\ y_{ij} & -x_{ij} & 1 \end{vmatrix} \begin{Vmatrix} a_j \\ b_j \\ \Delta Z_j \end{Vmatrix} + \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix}_{CP} \quad \text{Ecuación CP}$$

Las ecuaciones altimétricas se escriben para todos los puntos modelo, no para los centros perspectivos. El control altimétrico para puntos de control, aplicaciones APR (*Airbone Profile Recorder)* y puntos de control de agua, puntos lago, se introduce utilizando la ecuación de observación altimétrica anterior y ecuaciones de observación del tipo

$$\nu_{Z_{ci}} = Z_i - Z_{ci}$$

Si tenemos medidas de puntos de nivel sobre líneas de costa o de lagos en varios modelos podemos mejorar su nivelación sin conocer su altitud exacta del nivel del agua.

Una vez resuelto el sistema, se sustituyen los parámetros a, b, ΔZ en la ecuación inicial tridimensional y en la matriz de Rodríguez, obteniendo la ecuación tridimensional completa

$$\begin{vmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{vmatrix} = (1 + \lambda_j) R_j \begin{vmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ z_{ij} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{vmatrix}$$

Debido al alternativo ajuste planimétrico altimétrico y a la no linealidad del problema, ambos ajuste son repetidos alternativamente. Normalmente son suficientes de dos a tres iteraciones siendo optimista, después se determinan las coordenadas terreno.

Solución del sistema de ecuaciones

El Sistema de ecuaciones de observación indirectas formado es del tipo

$$v = A\ x_1 + B\ x_2 - l$$

Donde l es vector de observaciones; v es vector de residuos; x_1 es el vector de parámetros desconocidos y x_2 el vector de incógnitas de las coordenadas terreno. A y B son las matrices de diseño. Resuelto el sistema por mínimos cuadrados planteando la condición $v^T P v$ mínimo (donde P es la matriz de la unidad de pesos de las observaciones) las ecuaciones normales resultantes son

$$\begin{vmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A^T P l \\ B^T P l \end{vmatrix}$$

Eliminando las coordenadas terreno, desconocidas, de la ecuación anterior obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones normales reducidas

$$(B^T P B - B^T P A(A^T P A)^{-1} A^T P B) x_2 = (B^T P l - B^T P A(A^T P A)^{-1} A^T P l)$$

Normalmente se utilizan métodos directos para solucionar el sistema de ecuaciones normales reducidas y programación sofisticada se utiliza para conseguir tiempos de proceso adecuados. El proceso más avanzado es el de partición recursiva basada en el método de Gauss o Cholesky.

Puesto que el tiempo de proceso es altamente dependiente de la anchura de la banda de la matriz de ecuaciones normales reducida, se minimiza la banda. En muchos casos se realiza un reordenamiento automático de modelos normal a la dirección de vuelo.

Las coordenadas terreno x_2 se calculan sustituyendo los parámetros de transformación x_1 en el sistema de ecuaciones normales durante la última iteración. El proceso iterativo implica partir de unos valores de la transformación conforme 3D aproximados. Finalmente de los valores de los residuales (diferencias entre coordenadas terreno y coordenadas transformadas) obtenemos el factor de varianza σ_0^2 calculado del vector de residuales v, obteniendo

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P\ v}{r} \quad ; \qquad r = redundancia$$

Secuencia de cálculo en PATM-43

1. Se resuelven las ecuaciones lineales planimétricas obteniéndose (d, e, ΔX, ΔY) y a continuación se determinan (λ, c)
2. Se realiza una transformación con los parámetros anteriores para obtener las coordenadas de los puntos de paso y centros perspectivos (CP) usando la matriz de Rodríguez
3. Se resuelven las ecuaciones de altitudes no linealizadas de los puntos de paso y centros proyectivos por iteración para calcular los tres parámetros que quedan (a, b, ΔZ)
4. Se transforman nuevamente los puntos de paso y CP utilizando los parámetros (a, b, ΔZ) con la matriz de Rodríguez
5. Se itera repetidamente hasta conseguir que el proceso alcance la convergencia y un ajuste adecuado.

Ventajas de este tipo de ajuste 4-3

1. El paso de iteración planimétrico es lineal y por tanto no se necesitan valores aproximados de los parámetros escala y acimut. No es necesario un preproceso
2. En el caso del método directo aplicado en la resolución del sistema de ecuaciones normales el tiempo de procesador se reduce considerablemente (un factor 3) debido al tamaño de las matrices de trabajo de dimensiones 4m y 3m respectivamente, ante el tamaño de las matrices de la solución espacial completa con dimensiones de matriz 7m
3. El **modelo estocástico**, peso de las observaciones, es simple puesto que las coordenadas modelo x, y, z se utilizan en dos ajustes separados. La experiencia dice aplicar los siguientes pesos para un conjunto de datos homogéneos fotogramétricos

Ajuste del bloque planimétrico: $p_x = p_y = 1$ para puntos modelo

Ajuste altimétrico del bloque: $p_z = 1$ para puntos modelo

Centros perspectivos: $p_x = p_y = 0.25$, $p_z = 1$

Aplicaciones del método de modelos independientes

Los métodos de aerotriangulación por modelos independientes han sido ampliamente utilizados en todo el mundo en aplicaciones para cartografía distinguiendo dos grupos de proyectos específicos

En el primer grupo se realizan tareas de ingeniería, catastro y densificación de redes geodésicas donde se precisan determinaciones de puntos de alta precisión, la escala del fotograma oscila entre 1:4000 y 1:8000. En planimetría se utiliza una distribución de puntos de control densa con una exactitudes absolutas de 5 cm a 10 cm, igualmente si se necesitan precisiones de 10 cm a 20 cm en altimetría se debe proporcionar un denso control altimétrico del bloque. En el segundo grupo las aplicaciones son de cartografía a escalas medias para proporcionar control menor a grandes bloque fotogramétricos, consiguiéndose precisiones del orden de **0.1 mm a 0.2 mm a la escala del mapa.**

29. 4. Compensación por el método de haces

En el ajuste simultaneo, la unidad básica de medida es el par de coordenadas (x, y) de un punto objeto en el fotograma; a partir de estas fotocoordenadas de los puntos de paso y de control, en un ajuste mínimos cuadrados se estiman las coordenadas terreno de los puntos de paso y los elementos de la orientación exterior de los fotogramas.

Este método difiere del secuencial y de modelos independientes en que la solución da directamente las coordenadas finales en una única solución y no trata separadamente las orientaciones absoluta y relativa. Como resultado la solución y el tratamiento de errores asociados es más rigurosa al no ignorarse ciertas correlaciones. El proceso es iterativo y necesita, por tanto, de unos valores iniciales. En un ajuste por haces de una pasada o un bloque de fotogramas, con 60% de solape longitudinal y 20% transversal, calculamos directamente las relaciones entre las coordenadas imagen y coordenadas objeto, sin introducir pasos intermedios. **El fotograma es la unidad elemental de trabajo en el ajuste por haces.** En la figura 3 se muestra el principio en el que se basa el ajuste por haces de rayos.

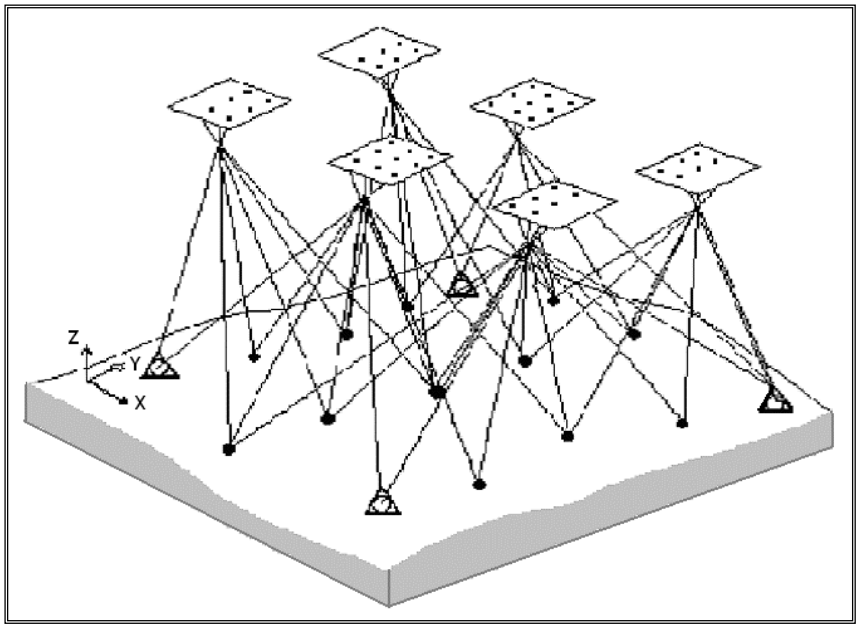


Figura 3. Principio del método de ajuste por haces de rayos

Vemos que las coordenadas imagen y el centro proyectivo de un fotograma definen un haz de rayos espacial. En el proceso de ajuste los elementos de la orientación externa de los fotogramas del bloque son determinados simultáneamente.

El principio del ajuste puede definirse señalando que los rayos son

- Desplazados (tres traslaciones (X_0,Y_0,Z_0)
- Rotados (tres rotaciones omega, φ, κ)

de forma que los rayos

- Intersectan unos con otros en los puntos de paso y
- Pasen a través de los puntos de control lo más cerca posible

Como se propuso en una lección anterior, una cámara fotogramétrica puede ser definida geométricamente introduciendo el concepto de lente (considerada como un punto) como centro de proyección con un punto imagen en el plano focal. El problema fotogramétrico general puede ser expresado matemáticamente con la proyección central del espacio objeto tridimensional en un espacio imagen bidimensional. Los observables y los parámetros del modelo geométrico están relacionados mediante las ecuaciones de colinealidad definiendo un modelo funcional del tipo observaciones indirectas. Tenemos el sistema de coordenadas en el espacio objeto (X,Y,Z) y un segundo sistema de coordenadas cartesiano que se utiliza para definir el sistema de

coordenadas imagen (x,y) en el plano focal de la cámara. Siendo (x,y) medidas de coordenadas placa relativas al sistema de marcas fiduciales, si (x_0,y_0) son traslaciones del punto principal obtenidas por calibración respecto al centro fiducial, si la distancia principal f es un valor constante para la misma cámara, entonces las coordenadas placa son trasladadas del sistema de marcas fiduciales al del punto principal, obteniéndose

$$\begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -f \end{vmatrix}$$

29. 4.1 Modelo funcional del ajuste por haces

El modelo funcional se obtiene de la condición geométrica de que el punto objeto P, el centro de proyección O y el punto imagen P' definen la misma recta, lo que se materializa en las ecuaciones de colinealidad

$$x_{ij} - x_0 = -f \frac{m_{11}(X_j - X_i^c) + m_{12}(Y_j - Y_i^c) + m_{13}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

$$y_{ij} - y_0 = -f \frac{m_{21}(X_j - X_i^c) + m_{22}(Y_j - Y_i^c) + m_{23}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

Donde (x_{ij},y_{ij}) son las coordenadas placa medidas del punto j en el fotograma i de un cierto bloque de aerotriangulación, (X_j,Y_j,Z_j) son coordenadas terreno del punto j en la foto i; (X_i^c,Y_i^c,Z_i^c) son las coordenadas del centro de proyección del fotograma i, m_{ij} son los elementos de la matriz de rotación M del fotograma i. Estas ecuaciones son las fundamentales de la fotogrametría analítica; estas dos ecuaciones juntas describen la orientación absoluta y la longitud del rayo de luz que une el centro de exposición i con el punto terreno j y el punto imagen j en el fotograma.

Para que estas ecuaciones puedan utilizarse en el ajuste, deben reducirse a su forma lineal y los errores aleatorios que siempre están presentes en las medidas pueden añadirse al modelo matemático. El modelo funcional a linealizar toma la forma

$$F_x = x_{ij} - x_0 + f\,\frac{m_{11}(X_j - X_i^c) + m_{12}(Y_j - Y_i^c) + m_{13}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

$$F_y = y_{ij} - y_0 + f\,\frac{m_{21}(X_j - X_i^c) + m_{22}(Y_j - Y_i^c) + m_{23}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

Las ecuaciones de colinealidad constituyen el modelo funcional del ajuste por haces de un bloque de aerotriangulación. Una vez linealizadas por aproximación de primer orden (aplicando Taylor), siendo X el vector de parámetros

$$X = (X_j, Y_j, Z_j, X_i^c, Y_i^c, Z_i^c, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i)^T$$

El vector de valores aproximados toma la forma

$$X_0 = (X_j^0, Y_j^0, Z_j^0, (X_i^c)^0, (Y_i^c)^0, (Z_i^c)^0, \omega_i^0, \varphi_i^0, \kappa_i^0)^T$$

La linealización del modelo funcional en un entorno de X_0 nos proporciona el siguiente sistema de ecuaciones de observación

$$\nu_{x_{ij}} + (\frac{\partial Fx}{\partial \omega_i})^0 \Delta\omega_i + (\frac{\partial Fx}{\partial \varphi_i})^0 \Delta\varphi_i + (\frac{\partial Fx}{\partial \kappa_i})^0 \Delta\kappa_i + (\frac{\partial Fx}{\partial X_i^c})^0 \Delta X_i^c + (\frac{\partial Fx}{\partial Y_i^c})^0 \Delta Y_i^c + (\frac{\partial Fx}{\partial Z_i^c})^0 \Delta Z_i^c +$$
$$(\frac{\partial Fx}{\partial X_j})^0 \Delta X_j + (\frac{\partial Fx}{\partial Y_j})^0 \Delta Y_j + (\frac{\partial Fx}{\partial Z_j})^0 \Delta Z_j + F_x^0 = 0$$

$$\nu_{y_{ij}} + (\frac{\partial Fy}{\partial \omega_i})^0 \Delta\omega_i + (\frac{\partial Fy}{\partial \varphi_i})^0 \Delta\varphi_i + (\frac{\partial Fy}{\partial \kappa_i})^0 \Delta\kappa_i + (\frac{\partial Fy}{\partial X_i^c})^0 \Delta X_i^c + (\frac{\partial Fy}{\partial Y_i^c})^0 \Delta Y_i^c + (\frac{\partial Fy}{\partial Z_i^c})^0 \Delta Z_i^c +$$
$$(\frac{\partial Fy}{\partial X_j})^0 \Delta X_j + (\frac{\partial Fy}{\partial Y_j})^0 \Delta Y_j + (\frac{\partial Fy}{\partial Z_j})^0 \Delta Z_j + F_y^0 = 0$$

Donde F_x^0 y F_y^0 son funciones de F_x y F_y calculadas con valores aproximados de ω_i^0, φ_i^0, κ_i^0, X_j^0, Y_j^0, Z_j^0. Las derivadas parciales también se calculan parar estos valores aproximados. La solución es iterativa, se van calculando $\Delta\omega_i$, $\Delta\varphi_i$ y $\Delta\kappa_i$ utilizándolas de aproximación en cada iteración hasta que las diferencias se hacen despreciables. La expresión matricial de las ecuaciones toma la forma

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta\omega_i \\ \Delta\varphi_i \\ \Delta\kappa_i \\ \Delta X_i^c \\ \Delta Y_i^c \\ \Delta Z_i^c \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{27} & a_{28} & a_{29} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta X_j \\ \Delta Y_j \\ \Delta Z_j \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} t_{ijx}^0 \\ t_{ijy}^0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_{x_{ij}} \\ v_{y_{ij}} \end{vmatrix}$$

Las ecuaciones de observación en notación matricial reducida se escriben como

$$\dot{A}_{ij}\ \dot{x}_i + \ddot{A}_{ij}\ \ddot{x}_j - t_{ij} = v_{ij}$$

Donde el vector de incógnitas constituido por las correcciones a los elementos de orientación exterior del fotograma i es como sigue

$$\dot{x}_i = (\Delta\omega_i, \Delta\varphi_i, \Delta\kappa_i, \Delta X_i^c, \Delta Y_i^c, \Delta Z_i^c)^T$$

El vector de las incógnitas constituido por las correcciones de los puntos de control del punto j es

$$\ddot{x}_j = (\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j)^T$$

El vector de constantes de observación es t_{ij}, con $l = (x_{ij}, y_{ij})$ el vector de observaciones reales, y F_x^0, F_y^0 calculados del modelo funcional con valores aproximados

$$t_{ij} = (x_{ij} - F_x^0, y_{ij} - F_y^0)^T$$

Las submatrices de la matriz de diseño correspondientes a las incógnitas de orientación exterior y coordenadas espaciales respectivamente son las obtenidas por linealización (matrices de Cartan)

$$\dot{A}_{ij} = \frac{-f}{m_3}[P \mid -Q] \ ; \qquad \ddot{A}_{ij} = \frac{-f}{m_3} Q$$

El vector de los errores residuales asociados a las observaciones será

$$v_{ij} = (v_{x_{ij}}, v_{y_{ij}})$$

El sistema queda de forma general

$$\dot{A}\ \dot{x} + \ddot{A}\ \ddot{x} - t = \nu$$

El número de ecuaciones de observación será igual a 2 Σ m_j (j=1 hasta n) y el número de incógnitas será (6m+3n). Si las tres coordenadas de los r puntos de control se conocen exactamente y sin error serán 6m+3(n-r)

Ecuaciones del control terrestre y orientación externa

Plantemos a continuación las ecuaciones de observación de las coordenadas terreno conocidas de un punto j, que toman la forma siguiente

$$\ddot{\upsilon}_{X_j} + \Delta X_j = X_j^0 - X_j^{00} = \ddot{t}_X$$
$$\ddot{\upsilon}_{Y_j} + \Delta Y_j = Y_j^0 - Y_j^{00} = \ddot{t}_Y$$
$$\ddot{\upsilon}_{Z_j} + \Delta Z_j = Z_j^0 - Z_j^{00} = \ddot{t}_Z$$

Siendo X^0, Y^0 , Z^0 coordenadas aproximadas y X^{00}, Y^{00}, Z^{00} coordenadas control conocidas. Igualmente se establecen ecuaciones de observación para los parámetros de la orientación exterior, quedando un sistema completa de ecuaciones de observación

$$\begin{aligned} \dot{A}\ \dot{x} + \ddot{A}\ \ddot{x} - t &= \nu \\ -\dot{x} \qquad\quad -\dot{t} &= \dot{\nu} \\ -\ddot{x} \quad -\ddot{t} &= \ddot{\nu} \end{aligned}$$

Normalmente el número de ecuaciones de observación es mayor que el número de incógnitas, esto implica que el sistema de ecuaciones de observación no tenga solución exacta y procederemos al ajuste por mínimos cuadrados, que nos proporcionará la mejor estimación lineal insesgada del vector de parámetros (elementos x de la orientación exterior de los fotogramas y de las coordenadas X, Y, Z de los puntos de paso desconocidos). Ecuación matricial del modelo funcional completo

$$\begin{vmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} t \\ \dot{t} \\ \ddot{t} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \upsilon \\ \dot{\upsilon} \\ \ddot{\upsilon} \end{vmatrix}$$

Forma matricial de las ecuaciones planteadas

$$\overline{A} \cdot \overline{x} \; - \; \overline{t} \; = \; \overline{v}$$

La solución mínimos cuadrados será:

$$\hat{x} = (\overline{A}^T \cdot \overline{P} \cdot \overline{A})^{-1} \cdot \overline{A}^T \cdot \overline{P} \cdot \overline{t}$$

29.4.2 Modelo estocástico

A continuación se define un modelo de comportamiento estocástico de las observaciones o variables aleatorias que intervienen (definimos una matriz de pesos de las coordenadas imagen que intervienen, la correspondiente matriz de pesos de los parámetros de la orientación exterior y la matriz de pesos de las coordenadas de control). Para ello se define la matriz de varianzas-covarianzas del vector (x_{ij},y_{ij}) como Σ_{ij} en la forma

$$\sum_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{vmatrix}$$

Donde σ_x^2, σ_y^2 son las varianzas de las observaciones y σ_{xy} su covarianza. Si consideramos σ_0^2 como la varianza a priori de la unidad de peso, la matriz de pesos P_{ij} del vector de observaciones l está relacionada con la matriz varianzas-covarianzas mediante la expresión

$$\sum_{ij} = \sigma_0^2 \, P_{ij}^{-1} = \sigma_0^2 \, Q_{ij}$$

siendo Q_{ij} la matriz cofactor a priori de las observaciones.

Si consideramos todas las coordenadas placa del punto j; $(x_{1j},y_{1j}),(x_{2j},y_{2j}),.....(x_{mj},y_{mj})$. Y suponiendo que las observaciones de los diferentes fotogramas son estocásticamente independientes, la matriz de pesos de estas medidas, que designamos por P_j, viene dada por

$$P_j = \begin{vmatrix} P_{ij} & . & 0 \\ & & \\ 0 & . & P_{mj} \end{vmatrix} \qquad ; \qquad \text{Orden}(P_j) = (2m,2m)$$

Si suponemos independencia estocástica para las 2mn medidas, la matriz de pesos de las observaciones fotogramétricas tendrá la forma

$$P = \begin{vmatrix} P_1 & . & 0 \\ 0 & . & P_n \end{vmatrix} \quad ; \quad \text{Orden}(P) = (2mn, 2mn)$$

La matriz varianzas-covarianzas de los parámetros de la orientación exterior y coordenadas de control tomarán la forma

$$\Sigma_i = \sigma_0^2 \, \dot{Q}_i \quad ; \quad \Sigma_j = \sigma_0^2 \, \ddot{Q}_j$$

Sobre todo en fotogrametría de corto rango es apropiado utilizar las coordenadas de control en unión con las medidas fotogramétricas incorporando los valores estimados, de su levantamiento topográfico, con su matriz varianzas-covarianzas. El proceso nos dará una nueva estimación de las coordenadas de control. Finalmente planteamos un sistema reducido de ecuaciones de observación (componentes aleatorias de medidas fotogramétricas) para exponer los métodos de cálculo, si tomamos la forma de las ecuaciones como

$$A\,x - t = \upsilon \quad ; \quad A = \begin{bmatrix} \dot{A} & \ddot{A} \end{bmatrix} \quad y \quad X = \begin{vmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{vmatrix}$$

El sistema de ecuaciones normales, que se obtiene de aplicar la condición de mínimo $v^T P v = \min$, nos queda de la forma siguiente

$$\begin{vmatrix} \dot{A}^T P \dot{A} & \dot{A}^T P \ddot{A} \\ \ddot{A}^T P \dot{A} & \ddot{A}^T P \ddot{A} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{A}^T P t \\ \ddot{A}^T P t \end{vmatrix}$$

Si definimos

$$\dot{N}_i = \Sigma \, \dot{A}_{ij}^T \, P_{ij} \, \dot{A}_{ij}$$

$$\ddot{N}_j = \Sigma \, \ddot{A}_{ij}^T \, P_{ij} \, \ddot{A}_{ij}$$

$$\overline{N}_{ij} = \dot{A}_{ij}^T \, P_{ij} \, \ddot{A}_{ij}$$

$$x = _ \, \dot{x}_1^T, ..., \dot{x}_m^T _ \, \ddot{x}_1^T, ..., \ddot{x}_n^T \, _^T$$

$$d = _ \, \dot{d}_1^T, ..., \dot{d}_m^T _ \, \ddot{d}_1^T, ..., \ddot{d}_n^T \, _^T$$

$$\dot{d}_i = \Sigma \, \dot{A}_{ij}^T \, P_{ij} \, t_{ij} \quad ; \quad \ddot{d}_j = \Sigma \, \ddot{A}_{ij} \, P_{ij} \, t_{ij}$$

Nos queda la ecuación la ecuación en la forma **N x = d**

$$N = \begin{vmatrix} \dot{N}_1 & \cdots & 0 & \overline{N}_{11} & \overline{N}_{12} & \cdots & \overline{N}_{1_n} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & & .0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & & .0 \\ 0 & \cdots & \dot{N}_m & \overline{N}_{m1} & \overline{N}_{m2} & \cdots & \overline{N}_{mn} \\ \overline{N}_{11}^T & \cdots & \overline{N}_{m1}^T & \ddot{N}_1 & \cdots & & 0 \\ \overline{N}_{12}^T & \cdots & \overline{N}_{m2}^T & 0 & \cdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & & 0 \\ \overline{N}_{1_n^T} & \cdots & \overline{N}_{mn}^T & 0 & \cdots & & \ddot{N}_n \end{vmatrix}$$

Solución del sistema de ecuaciones normales

El sistema de ecuaciones normales planteado anteriormente toma la forma descompuesta como sigue

$$\dot{N}\,\dot{x} + \overline{N}\,\ddot{x} = \dot{d}$$
$$\overline{N}^T\,\dot{x} + \ddot{N}\,\ddot{x} = \ddot{d}$$

En su solución tenemos que tener en cuenta que la matriz superior izquierda es hiperdiagonal con submatrices de 6x6 elementos, corresponde a los seis elementos de los parámetros de la orientación exterior de cada fotograma. La inferior derecha es igualmente hiperdiagonal con submatrices, de 3x3 elementos, correspondientes a las tres coordenadas incógnitas de cada nuevo punto. La inversión de las matrices hiperdiagonales es particularmente simple, cada submatriz puede invertirse independiente e individualmente

Despejando el vector de coordenadas incógnitas obtenemos

$$\ddot{x} = \ddot{N}^{-1}\,(\ddot{d} - \overline{N}^T\,\dot{x})$$

Las correcciones a las coordenadas del punto j toma la forma

$$\ddot{x} = \overline{N}_j^{-1}\,(\ddot{d}_j - \Sigma\,\overline{N}_{ij}^T\,\dot{x}_i),\ j = 1,..,n$$

Hemos tenido en cuenta que la matriz N es diagonal por bloques. Entonces una vez estimado el vector de correcciones a los elementos de orientación exterior de todos los fotogramas, se

pueden estimar las coordenadas de los puntos de paso según la expresión anterior. Basta con resolver un sistema de ecuaciones (3x3).

Sustituyendo el vector de coordenadas obtenido en la primera ecuación de la pareja de ecuaciones normales, obtenemos el **sistema de ecuaciones normales reducido** que se expresa como

$$S\dot{x} = e$$
$$S = \left(\dot{N} - \overline{N}\ddot{N}^{-1}\overline{N}^{T}\right);\ \text{orden}(S) = (6m,6m)$$
$$e = \dot{d} - \overline{N}\ddot{N}^{-1}\ddot{d}\quad \text{orden}(d) = (6m,1)$$

La matriz S puede considerarse compuesta por submatrices S_{ik} de ordenes (6,6) y viene dadas, una vez despejadas, por la fórmula

$$S_{ik} = \dot{N}_{ik} - \Sigma\, \overline{N}_{ij}\, \ddot{N}_{j}^{-1}\, \overline{N}_{kj}^{T} \quad ; \quad i,k = 1,....,m$$
$$\dot{N}_{ik} = 0 \quad si \quad i \neq k\ , \quad y \quad \dot{N}_{ii} \equiv \dot{N}_{i}$$

Por otro lado el vector e está compuesto de m vectores e_i de ordenes (6,1) dados por

$$e_i = \dot{d}_i - \Sigma\, \overline{N}_{ij}\, \ddot{N}_{j}^{-1}\, \ddot{d}_j \ ;\ i = 1,..,m$$

La submatriz S_{ik} representa en el sistema de ecuaciones reducido la contribución de las ecuaciones de observación asociadas a las imágenes de los puntos comunes a las fotografías i y k. Entonces, si los fotogramas no cuentan con puntos imagen comunes, necesariamente $S_{ik} = 0$ (si y solo si i distinto de k).

Existen algoritmos diseñados para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales (matrices banda y matrices hiperdiagonales orladas, método favorable en el caso de bloques cuadrados), donde se tienen en cuenta la contribución nula de los elementos cero. En el caso de que la matriz de los coeficientes tenga una estructura de banda.

29.5. Aplicaciones, ventajas y desventajas del ajuste de haces

29.5.1. Ventajas

Las ventajas que ofrecen las ecuaciones de colinealidad (ajuste por haces) sobre el ajuste por modelos independientes para resolver todo tipo de problemas fotogramétricos podemos resumirlas en las siguientes

- El modelo funcional admite, como hemos visto, la inclusión de ecuaciones de observación en las coordenadas de los puntos de control y los elementos de la orientación exterior
- Posibilidad de introducir constreñimientos (observaciones geodésicas, principalmente distancias y ángulos, orientación externa aproximada, puntos sobre líneas rectas, planos o superficies) entre los parámetros para reforzar la aerotriangulación
- Ofrece la posibilidad de incluir aplicaciones (estimación robusta, data snooping) para detectar, localizar y eliminar errores groseros en las observaciones mediadas
- Igualmente ofrece la posibilidad de incorporar a las ecuaciones de observación parámetros adicionales para moldear los errores sistemáticos de la imagen (distorsión de lentes del objetivo, refracción atmosférica, etc.)
- Determinación de la orientación interna con parámetros adicionales. Las cámaras no profesionales son usadas algunas veces en aplicaciones fotogramétricas. Entonces el mejor método de obtener y calcular los resultados de las imágenes tomadas con estas cámaras es numéricamente mediante el ajuste del bloque por haces. Introducimos como incógnitas en las ecuaciones de observación los elementos de la orientación interna. Así la solución de las ecuaciones normales

$$A^T P A x = A^T P l$$

estas ecuaciones nos proporcionan los elementos de la orientación interna de la cámara. El gran número de incógnitas del bloque de ajuste planteado necesita, obviamente, un gran número de puntos de control y puntos de paso.

- Las cámaras de aficionado presentan, normalmente la proyección central deformada significativamente por distorsiones de lentes y de la película. Estas influencias son tenidas en cuenta n el ajuste de haces introduciendo correcciones polinómicas en las ecuaciones de observación, cuyos coeficientes serán determinados en el ajuste. Tal tipo de ajuste se denomina ajuste del bloque por haces con parámetros adicionales o por **Autocalibración.**
- Esta técnica no es solo usada para cámaras fotográficas de aficionados, sino también con cámaras aéreas profesionales. Parámetros adicionales proporcionan un método poderoso de compensar errores sistemáticos. No es importante si estos errores son producidos como resultado de distorsiones de la película o como resultado de las anomalías de la refracción

- Método teóricamente más exacto de triangulación aérea (se plantea una relación directa entre la imagen y las coordenadas terreno sin pasos intermedios como la formación del modelo)
- Proporciona un medio de utilizar cámaras no convencionales o de aficionado sobre todo en aplicaciones industriales de de corto rango
- Posibilidad de integrar los elementos de orientación exterior particularmente en restituidores analíticos o digitales. Como consecuencia, las medidas sobre los puntos de control son innecesarias.

29.5.2. Desventajas

Desventajas del ajuste por haces respecto del ajuste por modelos independientes podemos señalar

- **Problema no-lineal**, las aproximaciones implican largos procesos
- Necesita de grandes prestaciones de ordenador
- No se pueden utilizar restituidores analógicos en las medidas
- El problema siempre es espacial sin posibilidad de separar el ajuste de planimetría de la altimetría.

Bibliografía

[1] Albertz J., Kreiling W. 1989. Manual fotogramétrico. Herbert Whichmann Verlag. Karlsruhe.

[2] Burnside C. D. 1985 *Mapping from aerial photographs*. Collins.

[3] Kraus, K. 1993. *Photogrammetry* Vol. 1. Dummlers Verlag. Bonn.

[4] Kraus, K. 1997. Photogrammetry Vol. 2. Dummlers Verlag. Bonn.

[5] Otero J., Sevilla M.J. 1989 Modelo matemático para el ajuste simultáneo mínimos cuadrados de un bloque fotogramétrico. Topografía y Cartografía, Vol VI - Nº 32, Madrid

[6] Sevilla M. J. y otros. 1993 Curso de Fotogrametría y GPS Instituto de Astronomía y Geodesia (UCM)

[7] Slama Ch.C. 1980. Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry. ASPRS

[8] Sanjib K. Ghosh. 1988. *Analitical Photogrammetry*. Pergamon Press.

[9] Wang, Z. 1990. Principles of Photogrammetry. Pres of Wuhan Techn. Univ. of Surveying and Mapping. Pekin

[10] Wolf. 1983. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill.

[11] Wolf, 2000. Elements of Photogrammetry with applications in GIS. McGraw – Hill

[12] Moffit F. H., Mikhail E. M.1980 *Photogrammetry*. Edt, Harper and Row. New York.

Tema 30. Fuentes de error en un ajuste de aerotriangulación: Concepto de Autocalibración y tratamiento de errores sistemáticos. Ajuste de bloque con parámetros adicionales. Modelo de Brown, modelo geométrico, otros modelos. Detección automática de errores groseros. Rango de errores groseros. Estimación robusta en aerotriangulación. Modelo Klein-Förstner y modelo danés.

30.1. Concepto de autocalibración y errores sistemáticos

En los primeros años de la aerotriangulación aérea se utilizaban polinomios para eliminar la deformación de una pasada sobre los estudios de propagación de errores en la formación de pasadas con equipos analógicos. Los polinomios derivados *por Vermeer, Schut, Bervoet, Lebanov y Von Gruber* estaban basados en la suposición de la presencia de errores sistemáticos y propagación de errores aleatorios.

Más tarde se fueron introducido métodos más rigurosos de compensación como el de modelos independientes y el ajuste por haces. Los modelos matemáticos en ambos casos están basados en la suposición de que solo se observan y presentan errores aleatorios en medidas fotogramétricas y terrestres. Todos los errores sistemáticos de las coordenadas (lineales y no lineales) se suponen detectados por adelantado y anulados o reducidos.

Cuando utilizamos métodos rigurosos, que se aplican a campos como la topografía catastral, densificación de redes topográficas, e igualmente utilizados con éxito en grandes bloques de cartografía topográfica, han de tenerse en cuenta algunas modificaciones:

- La **expansión del modelo funcional** para corregir errores sistemáticos de un grupo de imágenes en un bloque de aerotriangulación (**AUTOCALIBRACIÓN**).

- Mejora del modelo estocástico introduciendo pesos y correlaciones adecuadas en las observaciones fotogramétricas y datos de control terrestre.

Corrección de errores sistemáticos

Los métodos de corrección de errores sistemáticos pueden clasificarse en tres grupos principales

A) Antes del ajuste del bloque

Implica realizar una elaborada calibración de los instrumentos analíticos de medidas fotogramétricas y especialmente calibrar la cámara aérea. Esta tarea permite conocer las discrepancias entre el modelo matemático de la proyección central y la realidad física. A priori, las correcciones de los errores sistemáticos de la imagen implica aplicar sofisticadas técnicas de correcciones matemáticas. Para este propósito se utilizan mallas o redes de calibración; por economía se utilizan, a ser posible, más de cuatro marcas fiduciales para corregir las deformaciones de la película. Test de campo para la calibración de cámaras son habituales, e implica la toma de fotografías adicionales en el área de test antes y después de la misión fotográfica principal. El factor económico determinará la viabilidad de este método. En este caso se tienen en cuenta los errores sistemáticos debidos a la cámara, condiciones atmosféricas, otras causas de error en vuelo y durante las medidas. Todo ello supone la realización de un test integrado bajo circunstancias prácticas. Han de observarse un elevado número de puntos por fotograma para detectar errores sistemáticos. Tal número de puntos no está disponible en condiciones normales en los proyectos de vuelo.

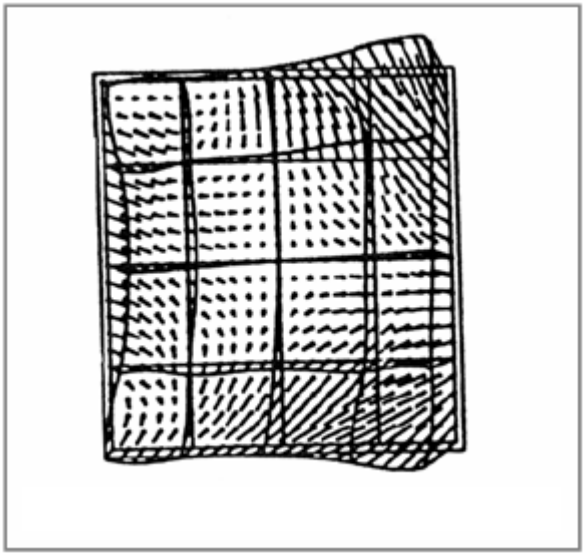


Figura 1. Deformación producidas en la imagen por errores sistemáticos

Desventajas de esta técnica:

- Necesita un buen mantenimiento del área de test no muy lejos del área de proyecto
- Necesita, también, vuelos adicionales antes y después de cada misión fotográfica

B) Durante el ajuste del bloque

Mediante un proceso empírico. Después del primer ajuste, los errores residuales (en el modelo observado o coordenadas fotográficas) son analizados para todo el bloque o parte de él. El modelo de errores sistemático detectado se utiliza para corregir coordenadas modelo o imagen. Entonces se repite el ajuste del bloque una y otra vez hasta que los residuales no muestran un significativo modelo de errores sistemático. El procedimiento es relativamente bueno, pero necesita excesiva interpretación manual por un operador. Por lo que el método más desarrollado para compensar los errores sistemáticos, durante el ajuste de bloque, es el denominado con el término Autocalibración.

C) Después del ajuste del bloque

Aquí se aplica un método de filtrado a los residuales de los puntos de control (obteniéndose un ajuste del bloque después del cálculo) para corregir errores sistemáticos. Se utiliza frecuentemente la interpolación por mínimos cuadrados. El método, en principio, no es tan eficaz como la Autocalibración y además necesita una red densa de puntos de control

Autocalibración

Establecida la universalidad de las ecuaciones proyectivas de colinealidad (proyección central), estas ecuaciones son aplicables en levantamientos fotogramétricos aéreos, espaciales o terrestres. Esto implica utilizar técnicas completamente rigurosas que se aplican también a casos cuando la cámara y los parámetros objeto relacionados pueden ser conocidos o desconocidos. En algunos otros casos estos parámetros se presentan como incógnitas y pueden ser obtenidos por cálculos analíticos con ordenador.

Inicialmente la Autocalibración se aplicaba en la determinación de la orientación interna de la cámara. A las ecuaciones de colinealidad se añadían condiciones (constreñimientos), que implican el reforzamiento del proceso de ajuste de las medidas, para formar algunas relaciones

funcionales o geométricas de forma que mejoremos el grado de fiabilidad. El valor de tales consideraciones estaba ligado a la habilidad de utilizar la información de forma amplia y profunda, reduciendo el número de incógnitas o reduciendo la magnitud de propagación de los errores. Hay que señalar que, para un problema dado, es posible más de una solución mínimos cuadrados teóricamente en función del modelo matemático formado. En la formulación del modelo matemático es en lo que podemos mostrar nuestras habilidades e improvisación. En el desarrollo de un modelo matemático, eliminando o introduciendo parámetros, podemos reducirlo bien añadiendo simplificaciones o manipulando las ecuaciones de observación.

30.2. Ajuste de bloque con parámetros adicionales

30.2.1 Modelo de Brown

Una de las aplicaciones más interesantes de las ecuaciones de colinealidad fue desarrollada por Brown **Autocalibración (Brown-1968)**, cuando implantó la técnica de calibración analítica (autocalibración desde el punto de vista físico con la inclusión de 21 parámetros) con el método SMAC (*Simultaneous Multiframe Analytical Calibration*), que admite un infinito número de formas para determinar la solución de un conjunto simple de parámetros de la orientación interior y coeficientes de distorsión de lentes. Descansa su modelo en la consideración de que tanto la deformación de la película su planeidad y su enfoque se mantienen en una serie de tomas fotográfica. Para su aplicación es necesario disponer de **un campo de test topográfico preciso**, donde se consideran las coordenadas de los puntos de control como observaciones. Se pueden notar de todas formas errores significativos en ciertas extensiones de terreno, al menos en puntos individuales.

Hay que remarcar que la Autocalibración necesita un bien seleccionado control en el espacio objeto para que el procedimiento sea efectivo como medio de la calibración de la cámara. Esta calibración se realiza trabajando con una serie de puntos distribuidos en el terreno, en estos casos se hace necesario que el campo de test tenga suficiente profundidad o el ángulo de campo de la cámara sea pequeño de forma que los elementos de la orientación interior y exterior no estén correlados y como consecuencia se puedan calcular con suficiente fiabilidad; en ocasiones es posible que se produzcan singularidades en el cálculo de la solución del sistema de ecuaciones normales en estos caso es necesario conocer los elementos de la orientación exterior de la cámara.

Para definir los seis parámetros de la orientación exterior que definen la localización espacial de la cámara y su orientación además de ocho parámetros de la calibración de la cámara que son

$$f, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3, P_1 \; y \; P_2$$

Se pueden utilizar siete marcas de test que proporcionan 14 observaciones, pero la solución obtenida sería única y sin comprobación. La experiencia indica que la distribución recomendable es que las marcas estén distribuidas en tres dimensiones de forma que se crucen en el formato completo de la cámara. Con un total de treinta marcas son suficientes aunque se utilizan alrededor de 50 a 100 con el fin de mejorar la redundancia y el análisis de fiabilidad.

En fotogrametría terrestre y de corto rango también es posible aplicar la Transformación Lineal Directa (TLD) en la determinación de los parámetros de orientación interna de la cámara en un trabajo de campo.

Para *Brown,* en sus planteamientos iniciales la formulación matemática de la Autocalibración implicaba la introducción de condiciones a priori en uno o más parámetros de la orientación exterior y puntos objeto en el sistema local y suponía tratar el conocimiento a priori de estos parámetros como observaciones indirectas. En este procedimiento el modelo matemático es modificado de tal forma que las ecuaciones de observación incluyen **parámetros adicionales** para corregir los sistematismos de las coordenadas modelo o fotocoordenadas. Los parámetros adicionales se seleccionan de acuerdo a **fuentes o causas físicas de los errores sistemáticos** (distorsión de lentes, deformaciones de la película, falta de planeidad de la película etc.- D.Brown)

Calibración por el método de campo de una cámara métrica

Las ecuaciones de colinealidad proporcionan la base en el esquema de calibración analítico para la Autocalibración de la cámara por el método de campo. Las ecuaciones a plantear se pueden extender con la introducción de los parámetros de la orientación interior, de forma que nos queda la ecuación de la fotocoordenada

$$\bar{x}_{ij} + F(k)\,\bar{x}_{ij} + F(P)[\,P_1(r_{ij}^2 + 2\bar{x}_{ij}^2) + P_2(2\bar{x}_{ij}\,\bar{y}_{ij})] = -\,f_x \frac{m_{11}(X_j - X_i^c) + m_{12}(Y_j - Y_i^c) + m_{13}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

Igualmente se plantea una ecuación para la coordenada y

$$\bar{y}_{ij} + F(k)\,\bar{y}_{ij} + F(P)[\,P_2\,(r_{ij}^2 + 2\bar{y}_{ij}^2) + P_1\,(2\bar{x}_{ij}\,\bar{y}_{ij})]$$

$$= -\,f_y\,\frac{m_{21}(X_j - X_i^c) + m_{22}(Y_j - Y_i^c) + m_{23}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

Donde como sabemos c representa un centro perspectivo; i hace referencia al fotograma; y j al punto objeto de control terrestre. A su vez x_{ij}, y_{ij} son las fotocoordenadas medidas de los puntos imagen, y x_0,y_0 las coordenadas observadas del punto principal supuesta constante.

$$\bar{x}_{ij} = x_{ij} - x_0$$
$$\bar{y}_{ij} = y_{ij} - y_0$$

La función de distorsión radial simétrica y constante viene dada por la expresión

$$F(k) = k_0 + k_1 r_{ij}^2 + k_2 r_{ij}^4 + k_3 r_{ij}^6 + ...$$

La función de distorsión tangencial supuesta constante para todos los fotogramas

$$F(P) = 1 + P_3 r_{ij}^2 + P_4\ r_{ij}^4 + ...$$

P_1, P_2 son coeficientes de corrección para distorsión por descentramiento también supuesta constante. Por otro lado f_x, f_y son las distancias focales efectivas en la dirección x e y. M representa la matriz de rotación con los términos m_{ij}.

Las ecuaciones planteadas se linealizan por Taylor según las cantidades medidas x_{ij}, y_{ij} ,y valores aproximados de los parámetros desconocidos. Obteniendo en notación matricial

$$\upsilon = A_1 x_1 + A_2 x_2 - l$$

Sobre este planteamiento de calibración completa, Brown establece las ecuaciones de Autocalibración añadiendo 21 coeficientes adicionales empíricos; $a_1, a_2, ..., a_7$; $b_1, b_2, ..., b_7$, que compensan las deformaciones de la película y la distorsión anómala. Y otros coeficientes $c_1, c_2, ..., c_7$, que definen la curvatura y falta de planeidad de la película.

Sesgos de elementos de orientación interior $\delta y_0; \delta x_0; \delta f$

Distorsión radial y descentramiento de lentes k_1, k_2, k_3, P_1, P_2

Expresión de la Autocalibración de bloque según el modelo de Brown (29 términos)

$$\Delta x = \bar{x}_{ij} + F(k)\,\bar{x}_{ij} + [\,P_2\,(r_{ij}^2 + 2\bar{y}_{ij}^2) + P_1\,(2\bar{x}_{ij}\,\bar{y}_{ij})]$$
$$a_1\,x + a_2\,y + a_3\,x^2 + a_4\,xy + a_5\,y^2 + a_6\,x^2y + a_7\,xy^2$$
$$+\frac{y}{f}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \delta y_0 + \frac{y}{f}\delta f$$

$$\Delta y = \bar{y}_{ij} + F(k)\,\bar{y}_{ij} + [\,P_2\,(r_{ij}^2 + 2\bar{y}_{ij}^2) + P_1\,(2\bar{x}_{ij}\,\bar{y}_{ij})]$$
$$b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2$$
$$+\frac{y}{f}(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + \delta y_0 + \frac{y}{f}\delta f$$

Obteniendo, en notación matricial, la expresión general del modelo de autocalibración

$$\upsilon = A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 - l$$

En aplicaciones de objeto cercano o micro rango los parámetros geométricos de la orientación interna y externa no existen o no son completamente conocidos, entonces pueden calcularse con la técnica de autocalibración. La disposición geométrica de las estaciones de la cámara, la intersección de rayos desde los puntos objeto hasta la cámara así como su distribución espacial a lo largo de la imagen es primordial y son factores que influyen en la precisión de las coordenadas de un objeto y los parámetros de calibración de la cámara.

El test de campo para cámaras terrestres puede extenderse también aplicando condiciones especiales de ortogonalidad o coplanariedad, y pueden utilizarse ajustes híbridos de haces sin valores aproximados conocidos aplicando la técnica de líneas o elementos verticales. En la calibración de cámaras terrestres es necesario cambiar el enfoque de la cámara para algunas tomas fotográficas en red entonces es posible aplicar el método de Autocalibración considerándolas como tomas diferentes lo que lleva a considerar que los parámetros de la distorsión radial y de descentramiento no se altera aunque haya sido reajustado su enfoque.

Concluiremos que en fotogrametría el concepto **Autocalibración** tiene dos significados

- Autocalibración de una cámara métrica o no métrica (terrestre o aérea) que aplica la técnica para determinar la orientación interior y los parámetros de distorsión de las lentes utilizando una zona de test con puntos de control.

- Autocalibración de un ajuste de bloque con el propósito de reducir los errores sistemáticos del conjunto de fotogramas para mejorar la exactitud de los puntos terreno obtenidos y las orientaciones externas.

30. 2.2 Modelo geométrico

Otro método de tratar los errores sistemáticos se basa en la extensión del modelo con la introducción de parámetros adicionales teniendo en cuenta consideraciones geométricas (implica corregir cientos de modelos de deformaciones) despreciando las otras fuentes físicas de error. Diferentes tipos de polinomios han sido propuestos para compensar los diversos modelos de deformación.

Las exactitudes empíricas en una orientación simultánea de un modelo de fotogramas por vienen dadas

$$\sigma_X = \pm\ 4.7\,\mu m\ \text{x}\ m_f$$
$$\sigma_Y = \pm\ 5.8\,\mu m\ \text{x}\ m_f$$
$$\sigma_Z = \pm\ 0.070\%\quad H$$

Un análisis de los errores en las coordenadas permite establecer una separación del error total en una componente sistemática σ_s y otra componente accidental σ_a; verificándose

$$\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_a^2}$$

Experimentalmente se obtiene

INCERTIDUMBRES	X (μm)	Y (μm)	Z ‰
σ	± 4.7	± 5.8	± 0.070
σ_s	± 4.1	± 5.0	± 0.063
σ_a	± 2.4	± 2.8	± 0.029

Las componentes sistemáticas de los errores en las coordenadas son muy altas, produciéndose unos coeficientes de correlación de hasta 0.8; como consecuencia nuestro modelo matemático debe mejorarse. La inclusión de parámetros adicionales elimina los errores sistemáticos de forma que solo quedan los errores accidentales.

Hasta aquí hemos usado las ecuaciones de colinealidad como ecuaciones de observación de forma que, además, hemos introducido correcciones en las ecuaciones de colinealidad a través de las coordenadas imagen medidas (distorsión de lentes, deformación de película, refracción y curvatura de la tierra), a pesar de ello necesitaríamos nuevos refinamientos de las coordenadas placa, debido a que

a) La calibración por distorsión de lentes puede estar fuera de tiempo

b) Las coordenadas calibradas de las marcas fiduciales, con las que determinamos la deformación de la película, son calculadas a una temperatura diferente a las del momento de toma fotográfica durante el vuelo

c) Las capas atmosféricas también cambian de una situación a otra y son distintas de la atmósfera estándar sobre la que basamos nuestros cálculos.

En el **caso de cámaras métricas** tendremos que considerar e introducir parámetros adicionales para modelar la **distorsión residual, deformación residual y refracción residual**. En el caso de cámaras de aficionado la inclusión de parámetros adicionales nos proporciona la corrección de distorsión de lentes completa y corrección de sistematismos, etc. Este tratamiento puede extenderse a los llamados errores accidentales y sistemáticos.

Las cantidades υ_x y υ_y aparecen en las ecuaciones de observación como resultando de los errores de medida accidentales. La inclusión de parámetros independientes mejora el modelo funcional, o en otras palabras el sistema funcional, y compensan los errores sistemáticos.

Estos parámetros independientes, que realizan la deseada compensación de errores sistemáticos, son introducidos en forma de coeficientes de polinomios. La coordenada x y la coordenada y cada una tienen su propio polinomio. Para este propósito reemplazamos el término correspondiente a las

$$x_0 = \sum \sum f_{ij}\, x^i y^j$$
$$y_0 = \sum \sum g_{ij}\, x^i y^j$$

coordenadas del punto principal x_0, y_0 por los correspondientes polinomios

Los dos primeros términos son traslaciones (i = 0, j = 0) y corresponde al punto principal $f_{00}= x_0$; $g_{00}= y_0$. Los restantes coeficientes del polinomio representan correcciones lineales, cuadráticas, hiperbólicas etc. Los coeficientes f_{ij} y g_{ij} se determinan en el ajuste total, estos coeficientes estarán óptimamente adaptados a los datos de imágenes utilizados.

En el cálculo debemos tener en cuenta la posible dependencia de estos parámetros con otros parámetros como los de la orientación exterior. Es deseable no manejar polinomios de grado alto para evitar comportamientos incontrolados. Aplicaremos métodos estadísticos para evaluar si la contribución de tales polinomios es significativa en la modelización **(test de significación)**

Elección de los parámetros adicionales

Varios autores han sugerido diversos parámetros adicionales para compensar errores sistemáticos en triangulación aérea. Encontramos un grupo de 12 parámetros publicados por Ebner y que se encuentran implementados en el programa de ajuste PATB-RS. Estos parámetros son ortogonales entre sí y respecto a los parámetros de la orientación exterior, de modo que aparecen pequeñas correlaciones en la matriz cofactor. A veces el mismo coeficiente se aplica sobre las dos coordenadas planimétricas, por ello expresamos el símbolo g_{ij} como el que describe el coeficiente. La cantidad b que aparece en algunas ecuaciones representa la base del fotograma.

Los desplazamientos que se añaden a la ecuación de colinealidad pueden expresarse como

$$\Delta x = \left[1, y, y^2\right]\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{bmatrix};\ \Delta y = \left[1, y, y^2\right]\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{bmatrix}$$

Desarrollando las dos expresiones obtenemos las correcciones en función de dieciocho coeficientes de los cuales seis modelan la orientación exterior

$$\Delta x = a_{11} + a_{12}\cdot x + a_{13}\cdot x^2 + a_{21}\cdot y + a_{22}\cdot xy + a_{23}\cdot x^2 y + a_{31.}\cdot y^2 + a_{32}\cdot xy^2 + a_{33}\cdot x^2 y$$

$$\Delta y = b_{11} + b_{12}\cdot x + b_{13}\cdot x^2 + b_{21}\cdot y + b_{22}\cdot xy + b_{23}\cdot x^2 y + b_{31.}\cdot y^2 + b_{32}\cdot xy^2 + b_{33}\cdot x^2 y$$

Si planteamos que los doce coeficientes sean ortogonales entre sí y con los tres parámetros de orientación. Esto significa que existe ortogonalidad entre los coeficientes de las ecuaciones formadas en los seis puntos estándar del fotograma, entonces las ecuaciones toman la forma

$$\Delta x = g_1 \cdot x + g_2 \cdot y - g_3(2x^2 - 4\frac{b^2}{3}) + g_4 \cdot xy + g_5(y^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_7 \cdot x(y^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_9 y(x^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_{11}(x^2 - 2\frac{b^2}{3})(y^2 - 2\frac{b^2}{3})$$

$$\Delta y = -g_1 \cdot y + g_2 \cdot x + g_3 \cdot xy - g_4 \cdot (2y^2 - 4\frac{b^2}{3}) + g_6(x^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_8 \cdot y(x^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_{10} x(y^2 - 2\frac{b^2}{3}) + g_{12}(x^2 - 2\frac{b^2}{3})(y^2 - 2\frac{b^2}{3})$$

Siendo b la base del modelo estereoscópico

Ebner desarrollo estos doce parámetros ortogonales lineales que corrigen los sistematismos en nueve posiciones estándar de la imagen según una malla de 3x3 puntos. En la figura 2 se muestran gráficamente los parámetros adicionales y su efecto sobre cada fotograma aislado.

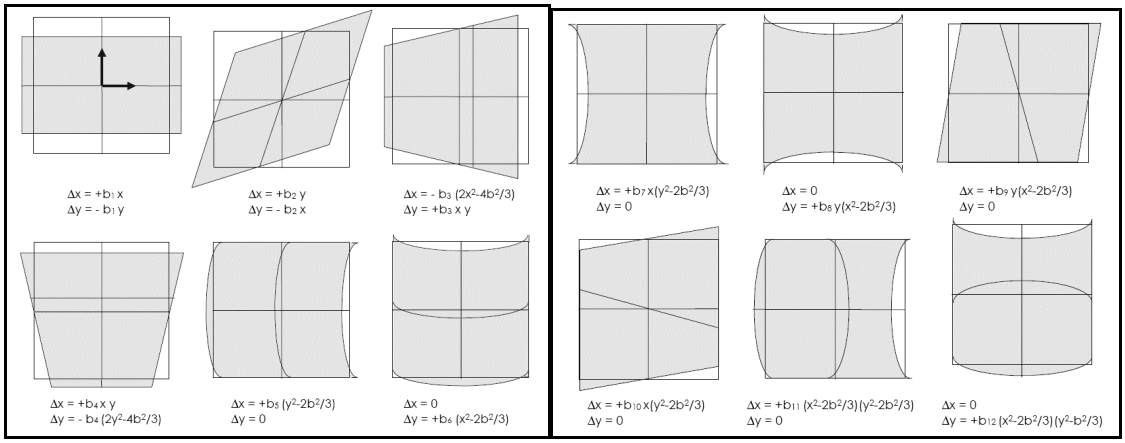


Figura 2. Parámetros adicionales y su efecto sobre cada fotograma aislado

Los parámetros adicionales **se aplican uniformemente a grupos de fotogramas aéreos**, tales grupos comprenden fotogramas que tiene

a) La misma cámara, la misma película y las mismas condiciones atmosféricas
b) Los fotogramas son producidos, copiados y almacenados de la misma manera
c) Son medidas en el mismo comparador (teniendo en cuenta la orientación de los fotogramas)

Un mismo grupo de parámetros adicionales puede utilizarse con diferente signo para los mismos coeficientes. Por ejemplo, si se quiere eliminar el **efecto de refracción atmosférica**, que se

produce cuando la cámara se monta a un lado del eje central del fuselaje del avión, que es modelado por el coeficiente g_4 entonces los parámetros adicionales para la ida y la vuelta de las pasadas tienen la siguiente forma

Ida	Vuelta
$x_0 = +g_4 \; x \; y$; $y_0 = -g_4 \; (2y^2 - 4b^2/3)$	$x_0 = -g_4 \; x \; y$; $y_0 = +g_4 \; (2y^2 - 4b^2/3)$

Para conseguir una compensación deseada de la refracción residual, durante las medidas de los fotogramas debemos respetar la misma orientación relativa del sistema de coordenadas.

Los parámetros adicionales no son del todo adecuados para modelar la distorsión residual de las lentes de la cámara y tampoco son adecuados para modelar la distorsión total de las lentes que necesitan un tratamiento individual**. La distorsión de lentes es primeramente radial**, los parámetros adecuados para su corrección serán (siendo $r^2 = x^2 + y^2$) de la forma

$$x_0 = g_{13} \; x \; (r^2 - r_0^2) \quad , \quad y_0 = g_{13} \; y \; (r^2 - r_0^2)$$

o bien

$$x_0 = g_{14} \; x \; (r^4 - r_0^4) \quad ; \quad y_0 = g_{14} \; y \; (r^4 - r_0^4)$$

La primera ecuación, si consideramos $r^2 = x^2 + y^2$, nos produce un polinomio de tercer grado con el radio r variable para la distorsión. Si utilizamos la segunda ecuación obtenemos un polinomio de quinto grado.

Los parámetros adicionales para modelar la **distorsión residual asimétrica o tangencial** toman la forma

$$x_0 = g_{15} \; (r^2 + 2x^2) \; ; \quad y_0 = g_{15} \; 2x \; y$$

$$x_0 = g_{16} \; 2 \; x \; y \; ; \quad y_0 = g_{16} \; (r^2 + 2 \; y^2)$$

Los problemas que se plantean con la introducción y uso de parámetros adicionales son los siguientes

- Por un lado la distribución de puntos de paso fotogramétricos, resultado de la configuración del vuelo o distribución de puntos de control, pueden hacer difícil o imposible la determinación de uno o más de estos parámetros; además algunos de estos parámetros pueden estar altamente correlados con otras incógnitas, de modo que resultará un sistema difícilmente bien condicionado.

- Es posible que sea imposible localizar áreas donde la influencia de los errores sistemáticos sea constante (para una banda o un modelo).
- El efecto de los errores groseros puede corregirse erróneamente con parámetros la inclusión de parámetros adicionales.

Las soluciones posibles a los problemas planteados son las siguientes

1. Con la utilización de polinomios ortogonales se puede reducir la correlación entre los propios parámetros y entre otros parámetros además de la orientación externa a determinar
2. Un bloque mal acondicionado se puede prevenir introduciendo parámetros adicionales como observaciones ficticias y dándoles adecuados pesos etc. Todo esto esta abierto a debate entre los investigadores
3. Por otro lado se deberían hacer test de significación estadística para eliminar parámetros no significativos (o grupos de parámetros). Esto requiere la inversión de las ecuaciones normales o al menos la inversión de ecuaciones normales reducidas en términos de parámetros adicionales solamente.

El estudio de la correlación entre los parámetros adicionales supone recurrir al factor de correlación

$$\rho_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii} \cdot q_{jj}}}$$

Estos factores se obtienen de los elementos de la matriz cofactor de incógnitas, inversa del sistema de ecuaciones normales $Q_{xx} = N^{-1}$. Un valor mayor de 0,9 para la pareja de coeficientes estudiados implica que se elimina uno de los dos. Igualmente se recurre a un test de significación para determinar si algún coeficiente es significativo y en cuyo caso eliminarlo. El test supone comparar un coeficiente adicional calculado durante el ajuste con la desviación estándar a posteriori del ajuste final. Se define la Hipótesis Nula en el caso de considerar que el parámetros no es significativo o se plantea la hipótesis alternativa que considera que el parámetros en cuestión es sí es significativo una vez definido el estadístico.

$$t_i = \frac{\hat{g}_i}{\hat{\sigma}_i} = \frac{\hat{g}_i}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{ii}}}$$

Conforme el coeficiente de correlación más se acerca a cero mayor es su diferencia. Cuanto más se acerquen en valor dos coeficientes más se aproximan a su función y en estos casos se aconseja eliminar uno de ellos, sin embargo en algunos parámetros presentan siempre una fuerte correlación

como la focal y la altitud en la calibración de las cámaras, en esta situación se establece que el polígono de test presente diferencias significativas de altitud para evitar esta situación.

También conviene evaluar la posibilidad de que la matriz de ecuaciones normales presente singularidades y esto se consigue con el test de determinabilidad que indica la correlación de un parámetro con el resto, cuantificándose el grado de correlación de uno de ellos respecto a una combinación de los demás. El factor determinabilidad se mide desarrollando la expresión

$$B = I - \left[(Diagonal\, N)(Diagonal\, N^{-1})\right]^{-1}$$

Los valores de B están comprendidos entre 0 y 1 (matriz de ecuaciones normales singular).
I es la matriz unidad y Diagonal N la diagonal de la matriz del sistema de ecuaciones normales. El valor de la medida debe ser mayor que 0,85 para los parámetros adicionales.

En estos momentos podemos concluir que, en general, la autocalibración puede considerarse la técnica más eficiente para corregir errores sistemáticos. Con todo es difícil encontrar un programa que permita la elección de parámetros y su prueba realizada automáticamente. La evaluación humana y decisiones intermedias todavía son necesarias. Estos ajustes con parámetros adicionales son frecuentemente utilizados en USA, Finlandia y Alemania.

Las dos técnicas principales para la elección de estos parámetros son las siguientes

1. Empezar desde arriba tomando todos los posibles conjuntos de parámetros y como consecuencia ir suprimiendo algunos de ellos de acuerdo con los resultados de los tests evaluados numérica y estadísticamente

2. Comenzar el proceso de ajuste desde abajo, seleccionando solo un mínimo de parámetros y, seguidamente, ir añadiendo más parámetros en diferentes estados de refinamiento. La elección del conjunto de parámetros y la secuencia utilizada están basados en la experiencia práctica, o bien también empezando con parámetros de términos lineales y continuar aplicando términos más altos. Desde un punto de vista teórico los parámetros adicionales aplicados y considerados en un ajuste por haces debería dar mejores resultados que cuando usamos modelos independientes, pero esto no siempre se cumple.

La experiencia práctica muestra que la magnitud de los errores sistemáticos es de un rango de 5 - 10 μm a la escala del fotograma. Merece la pena, por tanto, utilizar autocalibración si la adquisición de los datos es suficientemente exacta, no peor que 2 o 3 μm a la escala del fotograma. Esto implica

el uso de comparadores y puntos preseñalizados, y en algunos casos utilizar negativos originales para la medida. Evidentemente, un test de campo de autocalibración es inadecuado por motivos de coste en muchos casos.

Las correcciones de errores sistemáticos se aplican en trabajos de precisión a grandes escalas. En cuanto a la precisión del ajuste de grandes escalas, es importante remarcar que la alta exactitud se consigue regularmente y no en casos especiales.

Una exactitud típica en las coordenadas ajustadas, después del ajuste del bloque, con corrección de errores sistemáticos del orden de 3 a 4 μm pueden obtenerse bajo las siguientes condiciones

- 60 % de recubrimiento transversal
- Puntos preseñalizados
- Medidas realizadas con comparador o restituidor analítico.

En cartografía de pequeñas y medias escalas se puede esperar las mismas precisiones o mejores resultados. Un mal control de campo en cualquier caso impide la mejora. Normalmente la autocalibración no se aplica en pequeñas escalas. Áreas de test y pruebas realizadas con fotogramas a escalas 1:15.000 y 1:13.300 en Alemania y Australia confirman que la autocalibración puede tener éxito aplicada a la cartografía topográfica, usando puntos de control preseñalizados.

Compensación por haces con parámetros adicionales

El modelo con parámetros adicionales queda partiendo del modelo matemático (proyección central) que verifica que desde los puntos imagen se tiende un haz de rayos que pasa por el centro proyectivo y enlaza con los puntos objeto terreno. Las fórmulas del modelo funcional son como sabemos las ecuaciones de colinealidad a las que se añaden los factores de corrección sistemática Δx, Δy que describen los parámetros de deformación de la imagen, refracción, distorsión de lentes de la cámara, película etc.

El modelo matemático de compensación con parámetros adicionales tomará la forma siguiente.

$$v = A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 - l$$

Siendo x_1 los parámetros de orientación de la imagen, x_2 las coordenadas objeto a determinar y x_3 el vector correspondiente a los parámetros adicionales. En el caso de parametros adicionales geométricos encontramos definidos dos conjuntos diferentes de parámetros

1- Un conjunto de 12 parámetros de autocalibración (obtenidos por H.Ebner), que son 12 polinomios ortogonales normalizados linealmente independientes unos de otros y de la orientación exterior respecto de una malla regular de puntos imagen 3x3 en posiciones estándar del fotograma. Estos polinomios permiten corregir los sistematismos en 9 zonas fundamentales de la malla.

2- Un segundo conjunto de 44 parámetros de autocalibración se pueden aplicar (obtenidos por A.Grün). Igualmente son polinomios ortogonales normalizados, linealmente independientes, que necesitan para su adecuada aplicación de una malla de puntos imagen de hasta 5x5 puntos en las posiciones estándar del fotograma. Proporcionan corrección de deformaciones sistemáticas en 25 zonas de la malla de puntos. Este conjunto de parámetros debe aplicarse solamente cuando contamos con hasta 30 o 40 puntos imagen distribuidos homogéneamente sobre el fotograma si aplicamos los parámetros adicionales a todos los fotogramas del bloque.

30. 2.3 Otros modelos de autocalibración

Otros desarrollos con parámetros adicionales fueren planteados por El-Hakim y Faig en 1977 en forma de armónicos esféricos en la forma

$$\Delta x = a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + q\frac{x}{r}$$

$$\Delta y = a_1 \cdot y + a_2 \cdot x + q\frac{y}{r}$$

donde

$$q = A_{00} \cdot r + A_{20} \cdot r^2 + A_{11} \cdot r \cdot \cos\lambda + A_{22} \cdot r^2 \cdot \cos 2\lambda + A_{31} \cdot r^3 \cdot \cos\lambda + A_{33} \cdot r^3 \cdot \cos 3\lambda$$
$$+ B_{11} \cdot r \cdot sen\lambda + B_{22} \cdot r^2 \cdot sen2\lambda + B_{31} \cdot r^3 \cdot sen\lambda + B_{33} \cdot r^3 \cdot sen3\lambda$$

donde r es la componente radial de la distorsión imagen, $A_{ij}; B_{ij}$ son los coeficientes incógnitas.

Siendo $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$; y $\lambda = tag^{-1}\left[\frac{y - y_0}{x - x_0}\right]$

Estos desarrollos están implementados en distintos programas de aerotriangulación como por ejemplo en el programa de la Universidad de Hannover (Bundle Block Adjustment University) que introduce 28 parámetros independientes deducidos de los armónicos esféricos en la forma

$$\Delta x = P_1 \cdot y + P_2 \cdot x + P_3 \cdot x \cdot \cos 2\lambda + P_4 \cdot x \cdot sens2\lambda + P_5 \cdot x \cdot \cos\lambda + P_6 \cdot x \cdot sen3\lambda + P_7 \cdot y \cdot r \cos\lambda - P_8 \cdot y \cdot r \cdot sen\lambda + P_9 \cdot x(r^2 - c_1) + P_{10} \cdot x \cdot sen(r \cdot c_2) + P_{11} \cdot xsen(r \cdot c_3) + P_{12} \cdot x \cdot sen4\lambda$$

$$\Delta y = P_1 \cdot x - P_2 \cdot y + P_3 \cdot y \cdot \cos 2\lambda + P_4 \cdot y \cdot sens2\lambda + P_5 \cdot y \cdot \cos\lambda + P_6 \cdot y \cdot sen3\lambda + P_7 \cdot x \cdot r \cos\lambda + P_8 \cdot x \cdot r \cdot sen\lambda + P_9 \cdot y(r^2 - c_1) + P_{10} \cdot y \cdot sen(r \cdot c_2) + P_{11} \cdot ysen(r \cdot c_3) + P_{12} \cdot y \cdot sen4\lambda$$

30. 3. Detección automática de errores groseros

Dos requerimientos mínimos son necesarios para salvaguardar la presencia de errores groseros en las observaciones fotogramétricas.

- El primero es una buena planificación (buen diseño de proyecto) debería ser suficiente con un buen número de observaciones redundantes y una buena distribución de puntos de paso medidos.

- El segundo una buena técnica de detección de errores groseros, aplicable en las distintas fases de la aerotriangulación. Esta técnica debe ser eficiente, rápida, económica, por ordenador y amigable.

30. 4. Rango de errores groseros (TEST OEEPE)

De acuerdo con pruebas experimentales realizadas por la OEEPE los errores groseros podemos clasificarlos de la forma siguiente:

1) Pequeños errores groseros: Errores mayores que 4σ y menores que 20σ. No tienen influencia en la orientación de los modelos. No perjudica al dominio de linealización del ajuste. Los errores groseros del modelo **estocástico** y errores sistemáticos no se tienen en cuenta, pero pueden considerarse pequeños errores groseros, errores inferiores a 4σ se integran en errores aleatorios.

2) Errores groseros tipo medio: Errores comprendidos entre 20σ y una longitud de base (b). No tiene influencia en la geometría del bloque fotogramétrico y no perjudica la convergencia del ajuste.

3) Grandes errores groseros **:** Errores mayores que una longitud de Base (b). Cambian la

geometría del bloque e impide la convergencia del bloque, normalmente.

30. 5. Estimación robusta en aerotriangulación

La utilización del método de mínimos cuadrados en la compensación de bloques fotogramétricos presenta una serie de desventajas. Krarup, Kubik y Juhl opinan sobre ello lo siguiente:

"El método de mínimos cuadrados es eficiente en esconder los errores grandes y en distribuir sus efectos sobre muchas observaciones, tornándolos así irreconocibles. Las mediciones erróneas no son necesariamente las que tienen los residuales más grandes después de la compensación"

De forma general se define un método robusto de ajuste cuando no permite que el resultado sea afectado por errores groseros. El método de estimación robusta, adaptado a un ajuste fotogramétrico, es un método iterativo que pretende la determinación del residuo de las observaciones en un ajuste de forma que, al quedar eliminadas las observaciones erróneas durante la estimación, sus residuales nos indicarán su verdadero valor al no estar afectados por errores groseros. Después de la localización de todos los errores groseros, se realiza la compensación sin tenerlos en cuenta finalizándose el ajuste con las observaciones libres de errores groseros.

El método de estimadores robustos es aplicable a todo tipo de errores. Localiza los errores en función del tamaño de sus errores empezando con los errores de numeración, continuando con los errores de identificación y finalizando con la medida de estos errores.

Es fundamental para una buena detección de errores groseros una buena geometría del bloque, que dependerá del recubrimiento, la distribución y número de puntos de paso y control. El número de iteraciones necesarias para el resultado final también depende de la geometría y redundancia. Si la geometría es pobre y existen muchos errores groseros, serán necesarias más iteraciones para llegar al resultado final. El método puede fallar si la geometría del bloque es muy débil perdiéndose la capacidad de detectar errores groseros. Un ajuste por mínimos cuadrados extiende los errores en las observaciones con errores groseros y falsifica el resultado del ajuste. La adopción de correcciones normalizadas proporciona una alta probabilidad de identificar observaciones groseras, es posible en estas circunstancias identificar unos pocos errores groseros.

El esfuerzo que implica aplicar el método Data Snooping (Las bases teóricas fueron establecidas por W. Baarda en Delft y se le denomina, también, test de correcciones normalizadas; supone que solo hay un simple error grosero en las observaciones y ello no afecta a la linealización del modelo matemático; implica la búsqueda de un error grosero en cada iteración, no es posible detectarlos todos en una iteración) es relativamente grande (hace falta la suficiente redundancia de las componentes de las observaciones individuales) y puede fallar la búsqueda si las observaciones contienen un número relativamente grande de errores groseros. Se plantea, por tanto, encontrar unos principios de estimación que permitan una más correcta determinación bajo estas condiciones dadas. En función de esto se han desarrollado métodos de control de errores groseros aplicando la teoría de la estimación robusta, para evitar que un ajuste quede falsificado por la presencia de errores groseros, o al menos no muy deteriorado.

El principio de ajuste robusto

El principio de ajuste de estimación robusta más conocido y aplicado en compensaciones es el denominado de Norma-L_1. En este proceso se minimiza la suma absoluta de las correcciones (residuales), a diferencia del ajuste mínimos cuadrados en el cual se minimiza la suma de los cuadrados de las correcciones (Norma-L_2). Los algoritmos de ajuste de Norma-L_1 mínima son matemáticamente más complejos y necesitan más capacidad de proceso que los algoritmos de ajuste tipo Norma-L_2.

$$Norma\text{-}L_1 = \sum | v | = mínimo \qquad ; \qquad Norma\text{-}L_2 = \sum | v^2 | = mínimo$$

La pregunta que se plantea es si es posible adaptar matemáticamente de forma sencilla y simple estos algoritmos de cálculo al ajuste mínimos cuadrados de forma que se obtenga una gran robustez en el método basado en la Norma-L_1. Tal adaptación consiste en varias iteraciones del ajuste mínimos cuadrados y la introducción de pesos individuales entre iteraciones, a pesar de que todas las observaciones tienen la misma exactitud u homogeneidad. Los pesos pequeños son los que se corresponden con una magnitud absoluta de la corrección mayor en la iteración precedente.

Experiencias y trabajos con Norma-L_1 recientes nos llevan a pensar que en el futuro todos los ajustes serán aplicados por el método de la Norma-L_1 sin embargo si las observaciones solamente contienen errores accidentales, la Norma-L_2 es la que proporciona mejores resultados de exactitud que la Norma-L_1. En esta situación pretendemos conseguir una función de pesos dependiente de las correcciones en la cual los pesos de las observaciones con errores accidentales sean iguales a 1 y los pesos de las correcciones de las observaciones con errores groseros sean cero, o cercanas a cero.

30.6. Modelo KLEIN-FÖRSTNER

La función de pesos propuesta por Klein, H y Förstner, aplicada en los programas PATM y PATB, tiene la forma hiperbólica y cubren un rango amplio de errores groseros (pequeños, medianos y grandes) toma la forma siguiente.

$$P = P_i \cdot F(\upsilon_i, \sigma_{\upsilon_i}, Q) = P_i \cdot \frac{1}{1+(a_i|\upsilon|)^b}$$

$$a_i = \frac{1}{1{,}4 \cdot \hat{\sigma}_{\upsilon_i}} = \frac{\sqrt{p_i}}{1{,}4 \cdot \sqrt{r_i} \cdot \hat{\sigma}_0} \quad ; b = 3{,}5 + \frac{82}{81+Q^4} =$$

$$Q = \frac{\hat{\sigma}_0}{\sigma_{a\,priori}}$$

Donde υ_i =residual de la observación i

P_i =Peso a priori de la observación i

r_i =redundancia local de la observación i

$\hat{\sigma}_{\upsilon_i}$ =sigma estimado del residual υ_i

$\hat{\sigma}_0$ =sigma estimado del ajuste

Los parámetros a>0 y b>0 deben elegirse adecuadamente en cada iteración. Para υ = 0, p = 1 y cuando υ = ∞, p = 0. El parámetro b influye fuertemente en la pendiente de la curva, que puede observarse en la figura 3. Otros criterios de estimación robusta son

$\sum |v|^{1/2} = mínimo$; $\sum |v|^{1/4} = mínimo$

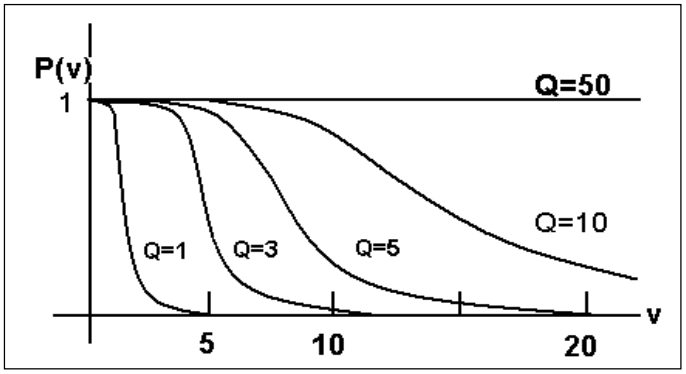


Figura 3. Función de pesos PAT-M43

30. 7. El modelo danés

Por sus ventajas, la extensión del método de estimación robusta ha sido reconocido y utilizado en muchas instituciones de investigación como el Instituto Geodésico de Dinamarca, donde se han implementado rutinas de detección automática de errores en grandes redes de compensación geodésicas, todo ello ha generalizado el método adaptado de estimación robusta que lleva su nombre. La estimación por el método Danés se realiza según el siguiente algoritmo iterativo mínimos cuadrados donde los pesos se determinan según la magnitud de los residuales de la iteración previa

Primera iteración: $p = 1$

Siguientes iteraciones: $p(\upsilon) = \exp\left(-0.05\left(k\frac{|\upsilon|\sqrt{p_0}}{\sigma_0}\right)^a\right)$ si $\frac{|\upsilon|\sqrt{p_0}}{\sigma_0} \geq c$

$p(\upsilon) = 1$ si $\frac{|\upsilon|\sqrt{p_0}}{\sigma_0} \leq c$

La constante c toma valores hasta 3, ν es el residuo de la observación, el símbolo p_0 denota valores de los factores de peso a priori convencionales, σ_0 es la desviación estándar de la unidad de peso de las medidas. El valor de k = 1.0 en la segunda iteración (después de la iteración p=1) e igual a 0.6 en la tercera. El valor de k es igual a 4.4 en la segunda iteración y 3.0 en la tercera.

Según lo anterior las funciones de peso aplicadas a ajustes de bloques fotogramétricos toman la forma

$$p(\upsilon) = \exp\left(-0.05\left(\frac{\upsilon}{\sigma_0}\right)^{4.4}\right)$$

Una vez realizada la primera iteración con peso unidad. La primera función se aplica a las siguientes tres siguientes iteraciones, y a continuación se aplica una función exponencial con exponente igual 3.0 para las demás iteraciones.

Estas son las diferentes funciones de peso utilizadas en fotogrametría. Estrictamente hablando estas funciones no pueden clasificarse dentro de la estimación robusta puesto que se minimiza una función que no es convexa. No se han planteado pruebas rigurosas de unicidad y convergencia. De todas formas este método se muestra muy efectivo en la localización de errores límite. Pruebas de simulación prueban la existencia de unicidad en las soluciones de estos métodos. J.E.Julia también utiliza funciones exponenciales de reducción de pesos, según el

modelo de Juhl, en el programa de compensación COBLO7RER, en las tres primeras iteraciones robustas; υ es el residual, σ_0 la desviación estándar de la unidad de peso y p el peso a asignar a la observación en cada iteración, según las expresiones siguientes

$$p(\upsilon) = \exp\left(-0.05\left(\frac{\upsilon}{\sigma_0}\right)^{4.4}\right); \quad p(\upsilon) = \exp\left(-0.05\left(0.6\frac{\upsilon}{\sigma_0}\right)^{6.0}\right)$$

Se realiza una compensación usual por mínimos cuadrados con peso unidad para todas las observaciones, a continuación se realizan 3 iteraciones robustas con la primera función de reducción pesos y las restantes con la otra función de reducción de pesos menos selectiva.

Gráficamente las funciones de peso toman la forma

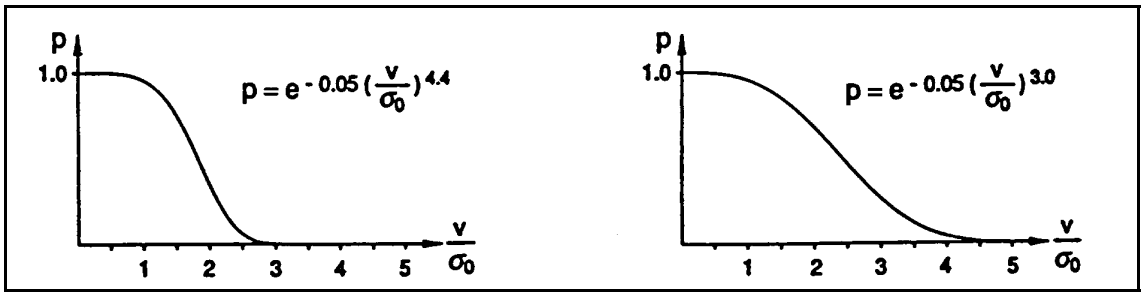


Figura 4. Funciones de peso

Conclusiones

Se debe hacer notar que los procesos robustos serán fiables si es grande la redundancia, las correcciones estarán falsificadas después de un ajuste mínimos cuadrados con observaciones con errores groseros a pesar de tener pesos mayores que los errores accidentales. En la práctica es aconsejable, por tanto, aplicar procesos de Data Snooping y robustos en combinación. En un gran bloque de ajuste fotogramétrico es recomendable comenzar con un proceso robusto para encontrar errores groseros grandes y, seguidamente, eliminar los pequeños errores de observación con el método Data Snooping. Después de la eliminación de los errores groseros se debe proceder a un ajuste mínimos cuadrados supuesto que las observaciones no tienen errores groseros y son de igual peso.

Bibliografía

[1] Albertz J., Kreiling W. 1989. Manual fotogramétrico. Herbert Whichmann Verlag. Karlsruhe.

[2] Atkinson, KB. 1997. "Close Range Photogrammetry and machine vision" Whittties Publishing

[3] Julia, J.E. 1992, Fotogrametría Analítica, E.T.S. de Ingenieros de Montes (U.P.M.) y Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (Universidad Nacional de Tucuman).

[4] Kraus, K. 1993. *Photogrammetry* Vol. 1. Dummlers Verlag. Bonn.

[5] Kraus, K. 1997. Photogrammetry Vol. 2. Dummlers Verlag. Bonn.

[6] Linder Wilfried, 2006. Digital Photogrammetry A practical Course. Springer

[7] Mikhail, E.M, Bethel J.S, Macglone J.Ch. 2001. *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons,Inc.

[8] Slama Ch.C. 1980. Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry. ASPRS

[9] Sanjib K. Ghosh. 1988. *Analitical Photogrammetry*. Pergamon Press.

[10] Wang, Z. 1990. Principles of Photogrammetry. Pres of Wuhan Techn. Univ. of Surveying

[11] Wolf. 1983. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill.

[12] PATB-NT_Tutorial

Tema 31. Control terrestre: Distribución de puntos de apoyo en un bloque de aerotriangulación y su influencia en la precisión del ajuste de la aerotriangulación. Precisiones de un bloque de modelos independientes. Precisiones en un bloque de haces. Fotogrametría y GPS. Ajuste combinado de aerotriangulación con GPS en el método de haces. Precisión del ajuste combinado por haces de rayos.

31.1. Distribución de apoyo en un bloque de aerotriangulación y su influencia en la precisión de ajuste del bloque de aerotriangulación

La reducción del número de puntos de control de campo (objeto principal de la aerotriangulación) lleva en general a una reducción de la exactitud comparada con la orientación absoluta de cada modelo con cuatro puntos de control de campo. Es por tanto importante poder estimar como influye esta reducción en la exactitud del un bloque y de cada modelo aislado. En este apartado se plantea la distribución adecuada de puntos de control en un bloque de aerotriangulación y su influencia en la exactitud del bloque tanto planimetría como en altimetría. El estudio se centra primero en un ajuste con modelos independientes y después un estudio de precisión en un ajuste por haces por último se introducen las condiciones y necesidades de un ajuste por haces con observaciones GPS cinemáticas.

La precisión de las coordenadas ajustadas en un bloque de aerotriangulación depende de

a) Error medio cuadrático de la unidad de pesos de final ajuste $\hat{\sigma}_0$ final del ajuste
b) De la Geometría del bloque que viene influenciado a su vez por

    a. El número y distribución de los Puntos de Control o Apoyo (PA)
    b. El número y distribución de los puntos de paso
    c. El recubrimiento de los fotogramas

El diseño del bloque y su geometría tiene una gran influencia no solo en la precisión del bloque sino también en la fiabilidad del ajuste y en la correcta detección de errores groseros.

La precisión absoluta de un bloque suele expresarse aproximadamente como

$$\sigma_B = \hat{\sigma}_0 \cdot Factor\ de\ Geometría\ Bloque$$

$\hat{\sigma}_0$ es el error medio de la unidad de pesos del ajuste final.

De acuerdo con la ley de propagación de errores, supuesto que no existen errores sistemáticos en el bloque, la precisión de un bloque se expresa como

$$\sigma_B = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{q_{xx}}$$

Siendo q_{xx} los elementos diagonales de la matriz cofactor de incógnitas. Con el fin de evaluar la precisión de un bloque también se pueden realizar estudios de simulación del propio bloque y por último un test con puntos de chequeo dentro del bloque.

31.2. Precisiones de un bloque por modelos independientes

En un ajuste de bloque espacial la exactitud planimétrica no está afectada por la exactitud de las alturas modelo o por la distribución de los puntos de control altimétrico. Igualmente, la exactitud en altitud es independiente de la precisión de las coordenadas modelo (x, y) y de la distribución de los puntos de control planimétrico. Por tanto las exactitudes en planimetría y altimetría serán tratadas separadamente. Los resultados en planimetría serán válidos para cualquier bloque ajustado.

31.2.1 Precisión planimétrica

Puesto que las coordenadas de los puntos de paso (x, y) son determinadas por una estimación por mínimos cuadrados, planteadas las ecuaciones por observaciones indirectas, determinaremos la exactitud (más correctamente los coeficientes de peso -coeficientes de la matriz cofactor- Q_{XX} y Q_{YY}) invirtiendo la matriz de ecuaciones normales. Debido a su estructura simétrica en X e Y, los coeficientes de peso Q_{XX} y Q_{YY} serán idénticos y los denotaremos por Q_{LL} en adelante. Entonces expresaremos la exactitud $\sigma_{B,L}$ de las coordenadas X, Y de un punto de paso después del ajuste del bloque como

$$\sigma_{BL} = \sqrt{Q}\ \ \sigma_0 = \sqrt{Q}\ \ \sigma_{ML}$$

σ_0 es el error medio cuadrático de la unidad de peso del ajuste (este valor oscila entre valores de 10 μm o menores en trabajos de precisión y valores de 10 μm a 20 μm si se trabaja con puntos pinchados), σ_x y σ_y las exactitudes de las coordenadas modelo x e y expresadas en coordenadas terreno. La cantidad $\sqrt{Q_{LL}}$ puede considerarse un factor que multiplicado por la exactitud $\sigma_{M,L}$ de las coordenadas XY en un modelo individual nos da la exactitud planimétrica $\sigma_{B,L}$ del bloque. En la siguiente figura 1 se presentan los factores $\sqrt{Q_{LL}}$ para varios tamaños de bloque y distribución de puntos de apoyo, cada una contiene un punto de control en las cuatro esquinas del bloque, σ_{media} denota el valor cuadrático medio de la exactitud de todos los puntos de paso del bloque. El estimador σ_{max} denota el máximo error planimétrico del bloque.

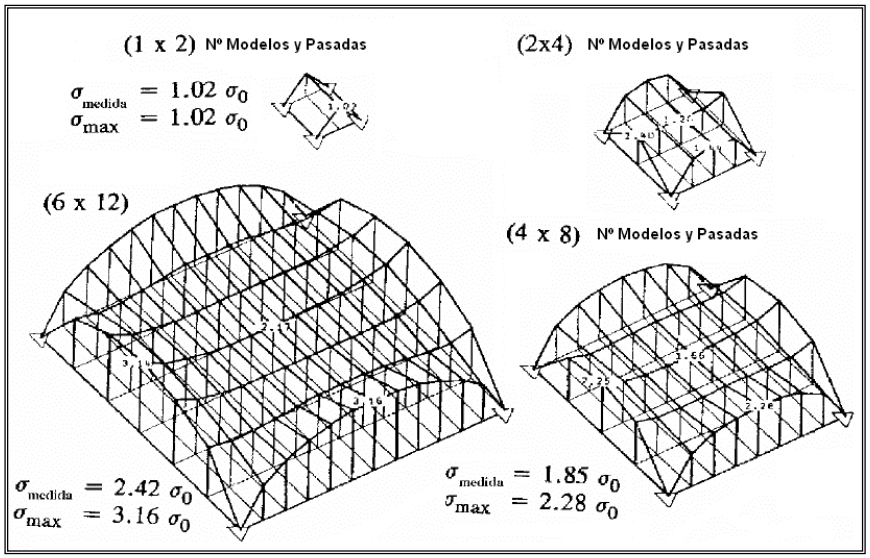


Figura 1. Precisión planimétrica

Del estudio de estos resultados podemos concluir las siguientes reglas

1) La exactitud cae significativamente cuando el tamaño del bloque aumenta
2) Los mayores errores cuadráticos medios se producen en la parte media de los perímetros.

Es evidente que si deseamos incrementar la exactitud de todo el bloque tendríamos que densificar el control terrestre a lo largo de los extremos del bloque, colocando puntos de control en los extremos de cada banda. El empleo de pasadas adicionales transversales, extendidas dos modelos al principio y final de la pasada, permite ahorrar puntos en el perímetro. La exactitud en estas condiciones es casi independiente del tamaño del bloque y se obtienen unos valores de exactitud muy cercanos al de un modelo simple. El interrogante que podemos plantear de como mejorar la exactitud del bloque en su parte central se contesta de acuerdo con las figuras anteriores. Concluimos que los puntos de control en el interior del bloque no mejoran significativamente la exactitud (F. Ackermann). Una generalización de estos resultados publicados por Ackermann, Ebner y Meissl para bloques cuadrados según las distribuciones de puntos P1, P2, P3, P4 (figura 2).

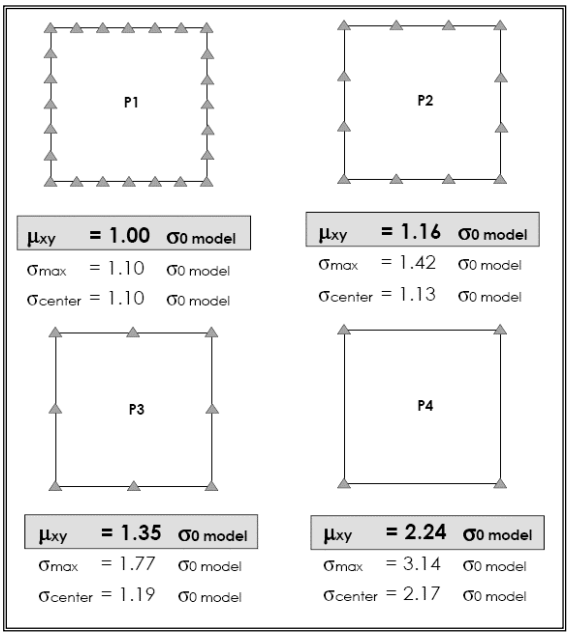


Figura 2. Resultados por Ackermann, Ebner y Meissl para bloques cuadrados

En las investigaciones realizadas con cámaras gran-angular (Ebner, 1972) se consideraron las siguientes exactitudes en las coordenadas de los modelos independientes (x, y, z) y los centros proyectivos (x_0, y_0, z_0)

$$\sigma_x : \sigma_y : \sigma_z : \sigma_{x0} : \sigma_{y0} : \sigma_{z0} = 1 : 1 : 1.5 : 4 : 4 : 1$$

Todas las coordenadas se estimaron como observaciones incorreladas. En las figuras el número i de modelos puente corresponde a dos longitudes de base a lo largo de los extremos del bloque, en estas experiencias los resultados fueron los siguientes (n_s número de pasadas del bloque), siendo el recubrimiento transversal de los bloques estudiados de 20% - 25%.

$$P1: \quad \sigma_{B,L,media} \approx (0{,}70 + 0{,}29 \log n_s)\, \sigma_{M,L}$$
$$P2: \quad \sigma_{B,L,media} \approx (0{,}83 + 0{,}02\ n_s)\, \sigma_{M,L}$$
$$P3: \quad \sigma_{B,L,media} \approx (0{,}83 + 0{,}05\ n_s)\, \sigma_{M,L}$$
$$P4: \quad \sigma_{B,L,media} \approx (0{,}47 + 0{,}25\ n_s)\, \sigma_{M,L}$$

Las reglas de precisión presentadas hasta aquí son válidas, aproximadamente, para bloques rectangulares, pero no lo son para el caso extremo de una simple pasada. La exactitud en una pasada se discutirá más tarde. La cercana igualdad entre la exactitud de bloques y modelos simples para bloques con gran densidad de control terrestre en los extremos del bloque (lo más importante en un caso práctico) también se mantiene cuando el bloque es irregular.

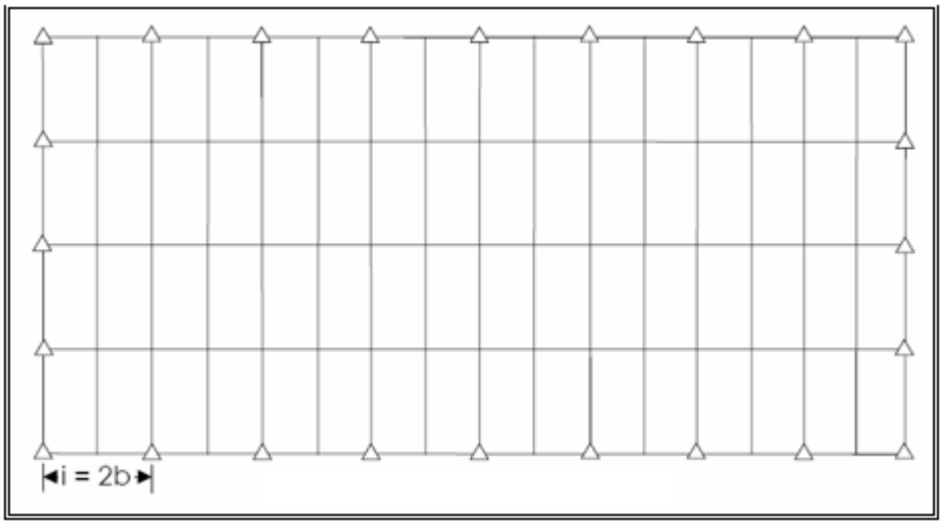


Figura 3. Distribución de puntos planimétricos

Hasta este punto, las exactitudes citadas están todas referidas a los puntos de paso en los extremos del modelo. Puntos simples, situados en el interior del modelo, tendrán menor exactitud. La exactitud en el interior del modelo de un punto simple será de 1,33 $\sigma_{M,L}$, un 33% menos. Ebner ha estudiado el efecto sobre la exactitud de un modelo simple usando más de cuatro puntos de paso en cada modelo. Estudiando 60 puntos de paso por modelo consiguió una mejora en la exactitud de solo un 25%. Por tanto, se puede concluir que el número de puntos de paso tiene poco efecto en la exactitud de las coordenadas de puntos simples después del ajuste del bloque.

31. 2.2 Precisión altimétrica

La exactitud altimétrica después del ajuste del bloque puede obtenerse, igualmente, de la inversión de la matriz de ecuaciones normales, de la misma manera que en el caso de exactitud planimétrica. Las relaciones análogas vienen dadas por

$$\sigma_{B,Z} = \sqrt{Q_{ZZ}}\ \sigma_0 = \sqrt{Q_{ZZ}}\ \sigma_{M,Z}$$

La exactitud altimétrica es principalmente dependiente del número i de modelos entre dos cadenas de puntos de control altimétrico (perpendiculares a la pasada) como se muestra en la figura siguiente

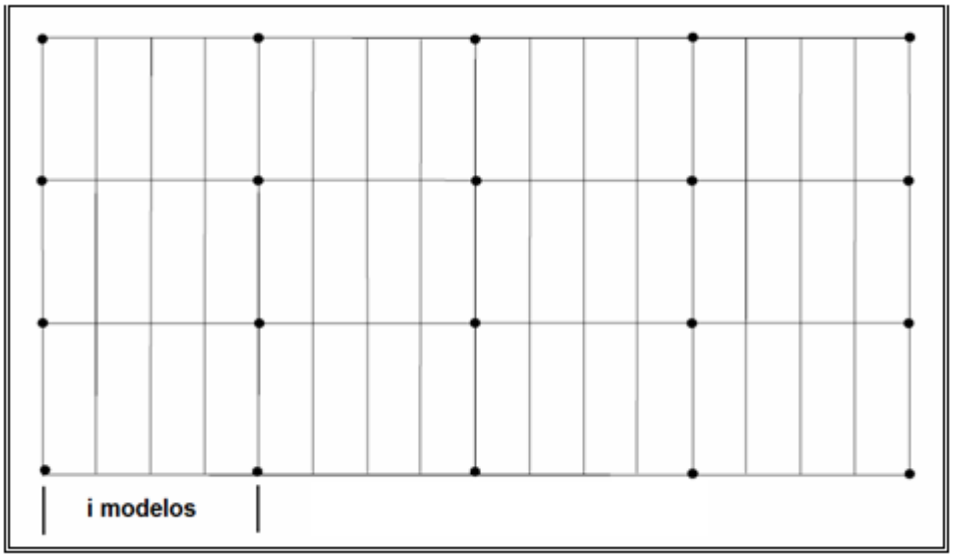


Figura 4. Distribución de puntos altimétricos

también mejoraremos la exactitud altimétrica colocando puntos de control en los extremos superior e inferior del bloque colocados a intervalos de i/2 modelos. La figura 4 muestra una distribución adecuada de puntos altimétricos.

La figura 5 muestra la relación entre la exactitud de las altitudes de los puntos en las esquinas del modelo y el número de modelos i puente entre puntos de control.

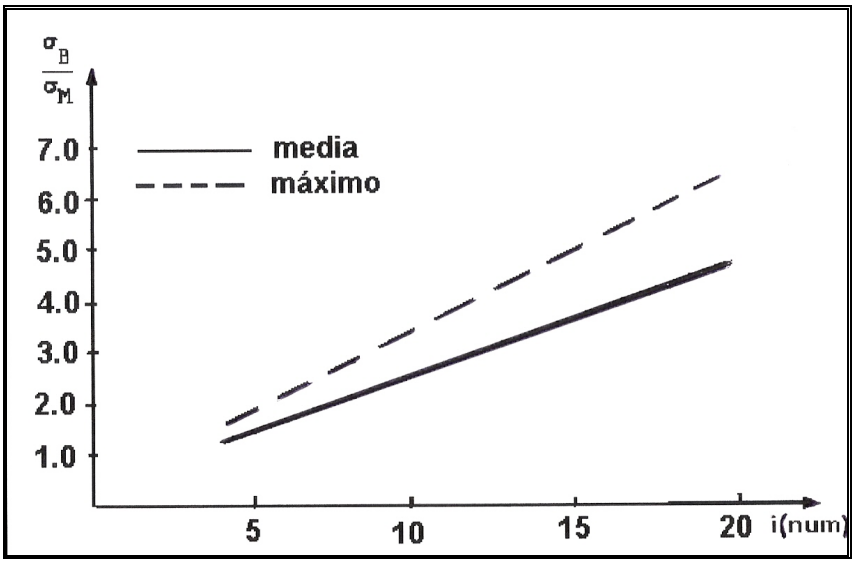


Figura 5. Relación entre la exactitud de las altitudes de los puntos en las esquinas del modelo y el número de modelos i puente entre puntos de control.

Se muestran, a continuación, resultados del valor cuadrático medio para el bloque completo y el valor máximo en la más desfavorable posición del bloque. Las correspondientes ecuaciones son
Vemos que comparado con la exactitud planimétrica, particularmente con densidad de puntos en

$$\sigma_{B,Z,media} \approx (0{,}34 + 0{,}22 \bullet i)\ \sigma_{M,Z}$$
$$\sigma_{B,Z,max} \approx (0{,}27 + 0{,}31 \bullet i)\ \sigma_{M,Z}$$

los extremos del bloque, la exactitud altimétrica es significativamente menos favorable. Un intervalo de unos tres modelos entre puntos de control es lo máximo admisible si no deseamos introducir perdidas de precisión en altimetría comparando con un modelo simple (aunque se verá afectada la economía del proceso entero). Como compromiso entre exactitud y economía, un intervalo de al menos cuatro modelos entre puntos de control es usual. La introducción de datos de estatoscopios y datos GPS en el ajuste del bloque libera al bloque de las restricciones en cuanto a la distribución de puntos altimétricos.

El mismo razonamiento aplicado en planimetría podemos aplicar en la detección de errores groseros. Debemos tener en cuenta que el método de mínimos cuadrados es muy eficiente en esconder errores grandes y distribuir sus efectos sobre observaciones de alrededor. Las medidas erróneas no son necesariamente aquellas que tienen los residuales más grandes después de la compensación. Los programas modernos de compensación cuentan con aplicaciones de detección de errores groseros, mediante el procedimiento muy extendido de estimación robusta. Este procedimiento está basado en el empleo de funciones de peso variables que permiten eliminar, después de varias iteraciones, la influencia de los errores groseros.

Exactitud planimétrica y altimétrica empírica

Las exactitudes teóricas presentadas hasta ahora en la compensación de un bloque de aerotriangulación por modelos independientes se basan en el supuesto de que los errores que se producen en cada modelo individual son accidentales. Los efectos de las exactitudes variables en un modelo y la indudable existencia de correlaciones debidos a errores sistemáticos se ignoran. Sin embargo, test empíricos sobre puntos de terreno de chequeo han confirmado la validez esencial de los resultados teóricos, así que podremos utilizar las ecuaciones expuestas con gran aproximación en los proyectos de planificación.

Calidad de los puntos medidos en el terreno

Los resultados presentados corresponden a compensaciones en las cuales los puntos de control terrestre fueron considerados sin error o puntos de test. Si introducimos puntos de control de distinta precisión las conclusiones sobre las precisiones obtenidas son las siguientes. Cuando los puntos medidos en el terreno tienen una precisión parecida a la de la medición fotogramétrica, la precisión final de la compensación resultará afectada muy poco. Pero cuando los puntos terreno realmente son de mala precisión, esto influirá evidentemente en al precisión final de la compensación.

31.2.3 Precisión de una pasada de aerotriangulación

La exactitud de los puntos en un ajuste de una pasada, por modelos independientes, depende primeramente del número i de modelos entre puntos de control de la pasada. Estaremos interesados en dos valores, una exactitud media $\sigma_{P,media}$ que es representativa de una pasada, y de un valor máximo $\sigma_{S,max}$ del error producido entre puntos de control.

Debemos diferenciar entre puntos señalizados, naturales y artificiales, entonces es normal expresar el error cuadrático medio de la pasada σ_S y el error cuadrático medio de un modelo simple σ_M

Los resultados teóricos y empíricos de la exactitud de una pasada de triangulación se presentan en la siguiente figura; con todo el diagrama se muestra simplificado de modo que se pueda utilizar en la práctica de forma sencilla; téngase en cuenta que las diferencias mayores del 50% de los valores presentados en la figura cuando suponemos casos individuales.

Los ejemplos numéricos muestran que la reducción en exactitud causada al incrementar el número de modelos entre puntos de control (altimétricos) es significativamente menos importante que la mejora en exactitud por el incremento de la escala del fotograma.

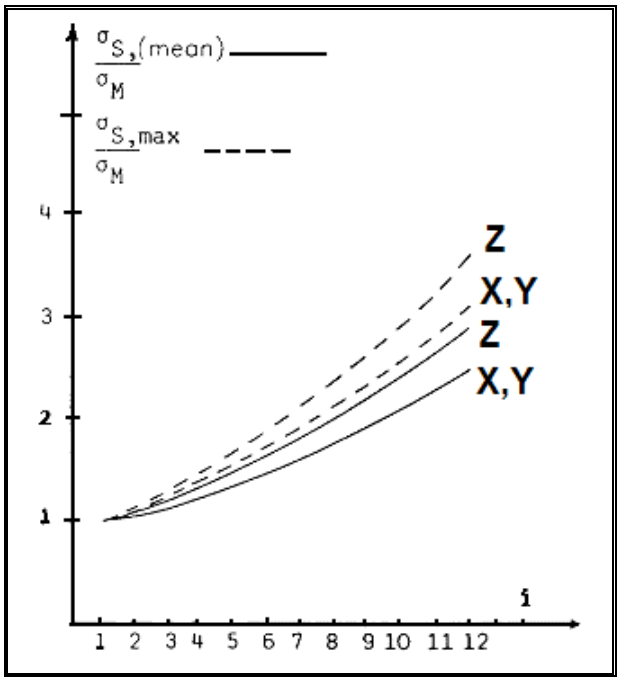


Figura 6. Resultados teóricos y empíricos de la exactitud de una pasada de triangulación

31.3. Precisión en un bloque de haces

A pesar de que el modelo matemático de un ajuste de un bloque por haces difiere significativamente de un ajuste por modelos independientes (en el primero se aplica la proyección central sobre coordenadas imagen como observaciones y por otro lado transformaciones de semejanza con coordenadas modelo como observaciones en modelos independientes) las reglas y razonamientos sobre la exactitud de los ajuste por modelos independientes pueden aplicarse, en mayor o menor grado al ajuste por haces.

La precisión de un fotograma aislado (solo errores accidentales o aleatorios) puede utilizarse y desarrollarse para estimar el ajuste de un bloque regular del 60% de solape longitudinal y 20% transversal para un punto señalizado como

Planimetría: σ_{XY}= ± 3 μm a escala fotográfica

Altimetría: σ_Z = ±0.03 % la altitud de la cámara (NA-WA)

Altimetría: σ_Z ±0.04 % la altitud de la cámara (SWA).

En los estudios de precisión del ajuste simultáneo las coordenadas imagen son tratadas como incorreladas de peso unidad. En estas condiciones el error estándar de la unidad de peso del ajuste σ_0 está relacionado directamente con la exactitud de las coordenadas imagen. Si suponemos las variables estadísticas $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{xy} = \sigma_{BL}$, referidas a la escala de la imagen, se podrán expresar como función de σ_0 (siendo $\sigma_{B,L}$ la exactitud media planimétrica del ajuste del bloque)

Los resultados experimentales se muestran a continuación con solapes del 20% y 60%. En las distribuciones de puntos del bloque tipo P2, P3 y P4, se observa un comportamiento lineal entre las variables estadísticas σ_0 y $\sigma_{B,L}$ (siendo n_s el número de pasadas). Para la distribución de puntos P1 el comportamiento es constante

	Recubrimiento 20%		Recubrimiento 60%
$P1:$	$\sigma_{B,L,media} \approx 0.9\ \sigma_0$	;	$\sigma_{B,L,media} \approx 0.6\ \sigma_0$
$P2:$	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.5 + 0.025\ n_s\ )\ \sigma_0$	;	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.4 + 0.015\ n_s\ )\ \sigma_0$
$P3:$	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.3 + 0.080\ n_s\ )\ \sigma_0$	;	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.3 + 0.040\ n_s\ )\ \sigma_0$
$P4:$	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.0 + 0.027\ n_s\ )\ \sigma_0$	;	$\sigma_{B,L,media} \approx (\ 0.0 + 0.140\ n_s\ )\ \sigma_0$

Como en los resultados del ajuste con modelos independientes la exactitud altimétrica, en método de haces, es independiente del tamaño del bloque; depende del número de modelos i entre los puntos de control en cada pasada, además su comportamiento es una función lineal de la distancia o número de modelos i entre puntos de apoyo.

Las exactitudes altimétricas se expresan como

$$\sigma_{B,Z,media} \approx (\ 1.0 + 0.18\ i\ )\ \sigma_0\ ; \qquad 20\%$$
$$\sigma_{B,Z,media} \approx (\ 0.0 + 0.31\ i\ )\ \sigma_0\ ; \qquad 60\%$$

Nota: La exactitud para de un bloque calculado por modelos independientes se expresan con los estimadores σ_{xy} y σ_z, mientras que los resultados de un ajuste simultáneo por haces viene dado por σ_0 Para permitir una comparación entre ambos ajuste se proporcionan las siguientes relaciones

$$\sigma_{xy} \approx 1.5\ \sigma_0 \qquad ; \qquad \sigma_z \approx 1.4\ \left(\frac{f}{b}\right)\ \sigma_0$$

Gráficos de los resultados planimétricos en un ajuste por haces con distintos recubrimientos

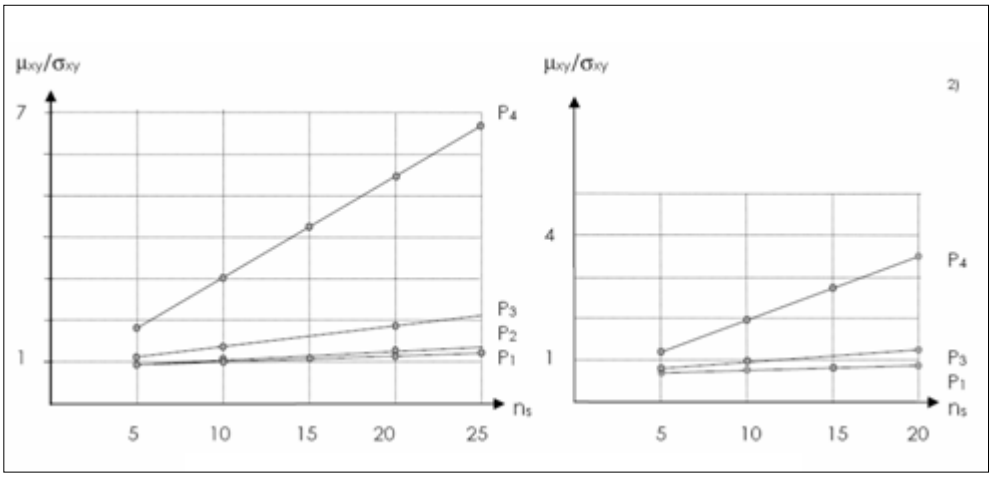


Figura 7. Resultados planimetritos con el 20% y 60% de recubrimiento.

Como resumen se presenta una distribución de puntos de apoyo en un bloque de Aerotriangulación tal como se aplicaba en la ejecución del Mapa Nacional, aplicando el método indirecto de aerotriangulación, basado en la medida de dos tipos de observaciones: por un lado la medida de puntos terreno de coordenadas conocidas según una distribución estándar de puntos de control como muestra la siguiente figura 8. La secuencia de distribución de puntos de control, en el modo convencional de trabajo, era de un punto terreno cada tres modelos en el contorno del bloque, y un punto de control cada cinco modelos en el interior del bloque.

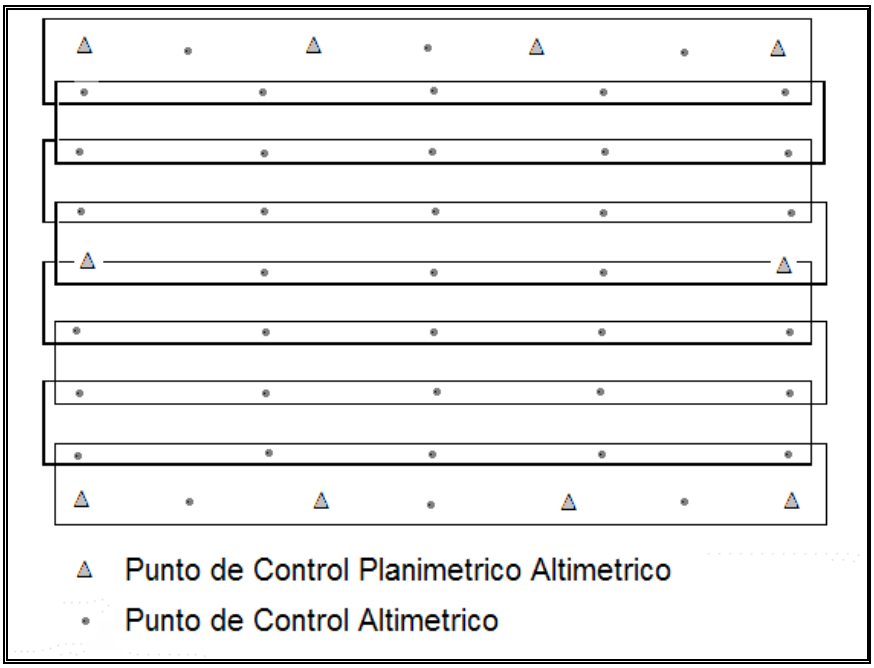


Figura 8. Distribución estándar de puntos de control

31.4. Fotogrametría y GPS

Durante años los fotogrametristas han deseado realizar levantamientos fotogramétricos sin preocuparse del control de terrestre. Con la aparición del Sistema GPS (*Global Positioning System)* se ha podido cumplir este deseo.

Este sistema nos proporciona nueva información que permite solucionar problemas fotogramétricos, cartográficos o topográficos de todo tipo con una sustancial mejora económica, exactitud y flexibilidad operacional en las aplicaciones de aerotriangulación. El problema que se plantea es conocer como se combina esta información en la estructura existente de la fotogrametría. En este capítulo trataremos de avanzar en estos nuevos conceptos. Las preguntas fundamentales que se plantean son: ¿Cómo el modelo de errores aleatorios y sistemáticos, propios de la información GPS, se combinan con los propios de la información fotogramétrica? ¿Cuál es la geometría de bloque con datos GPS más efectiva para todos estos propósitos?

Aplicaciones GPS en Fotogrametría

El posicionamiento GPS se aplica en fotogrametría en las siguientes tareas

a) En levantamientos topográficos para determinar puntos de control terrestre GPS que se utilizan posteriormente en el ajuste de bloques de aerotriangulación. Resulta proyectos muy prácticos y económicos, no necesitan intervisibilidad entre estaciones

b) Navegación aérea asistida con GPS de vuelos fotogramétricos. Utilizan posicionamiento en tiempo real con código C/A y ppseudodistancias. La exactitud requerida varía de 5 m a 100 m en posición (de 20 m a 200 m en altimetría) para escalas fotográficas comprendidas entre 1:5000 y 1:100000. El posicionamiento de *Airborne Laser Profile* necesita una exactitud mayor del orden de 10 m o mejor en tiempo real en posición

c) Posicionamiento GPS cinemático de la cámara aérea durante el vuelo para su posterior integración en un ajuste combinado de aerotriangulación

d) Posicionamiento de todo tipo de sensores aerotransportados (escáneres multiespectrales, sensores térmicos, escáneres láser, altímetros radar etc.)

e) Determinación de la orientación externa por el método directo Determinación completa de la orientación exterior, bien con ayuda de sistemas inerciales o bien disponiendo de un sistema multiantena (3 a 4 antenas GPS) en el avión aunque esta última técnica ya se ha abandonado.

Breve descripción de la señal GPS

El posicionamiento GPS está basado en señales electromagnéticas (rango de microondas) emitidas desde satélites de la constelación NAVSTAR, obteniéndose de esta información datos sobre la distancia entre receptor y satélite.

Distinguimos entre observaciones de código (C/A y P sobre L1 y P sobre L2), determinan ppseudodistancias, y observaciones de fase sobre ondas portadoras L1 y L2. Las posiciones de los satélites (efemérides) y las posiciones de las antenas de los receptores están referidas al sistema de coordenadas geocéntrico WGS84, un sistema cartesiano fijo al sistema Tierra.

Señal	Frecuencia f	Longitud Onda λ=c/f	Exactitud λ/100
Portadora L1	1575.42 MHz	0.1905 m	1.9 mm
Portadora L2	1227.60 MHz	0.2445 m	2.4 mm
P-código	10.23 MHz	29.31 m	2.9 m
C/A-código	1.023 MHz	293.1 m	29 m

Tabla 1.

Las ondas portadoras son moduladas en frecuencia por secuencias de PN (pseudo ruido o secuencias pseudoaleatorias) de código P y C/A. El código C/A es recibido en tiempo real pero está sujeto a la disponibilidad selectiva (SA) y otros errores sistemáticos (multitrayectoria, ionosféricos, tropos férricos, orbitales, etc.) lo que producen errores aleatorios, sistemáticos y groseros en las precisiones de las medidas de hasta 30 m y 40 m. Se resumen en cuatro tipos de errores

1) Errores que afectan a la precisión del satélite (determinación de la órbita y sistema de tiempo) incluidos los propios del Sistema de Referencia WGS84
2) Errores que afectan a la propagación de la señal (refracción ionosférica y troposférica, multitrayectoria y efectos relativistas
3) Errores del reloj del receptor GPS
4) Ruido del receptor y errores menores debidos al diseño y construcción del equipo en los procesos de fabricación del receptor y la antena
5) El posicionamiento con ppseudodistancias garantiza una exactitud mejor que 5 m con un 95% de probabilidad. Las observaciones de fase de la portadora en aplicaciones aerotransportadas dan precisiones de hasta milímetros, pero tienen el problema de la determinación de la ambigüedad de ciclos inicial. Los efectos de los errores citados del sistema GPS pueden compensarse aplicando métodos de posicionamiento diferencial GPS. Se opera normalmente con cálculos de dobles diferencias (observaciones a dos satélites) entre al menos un punto de referencia fijo de coordenadas conocidas (en aplicaciones fotogramétricas) y un receptor móvil en el avión. Con GPS diferencial la exactitud relativa con dobles diferencias y fase de la portadora la exactitud es de 2 a 5 cm.

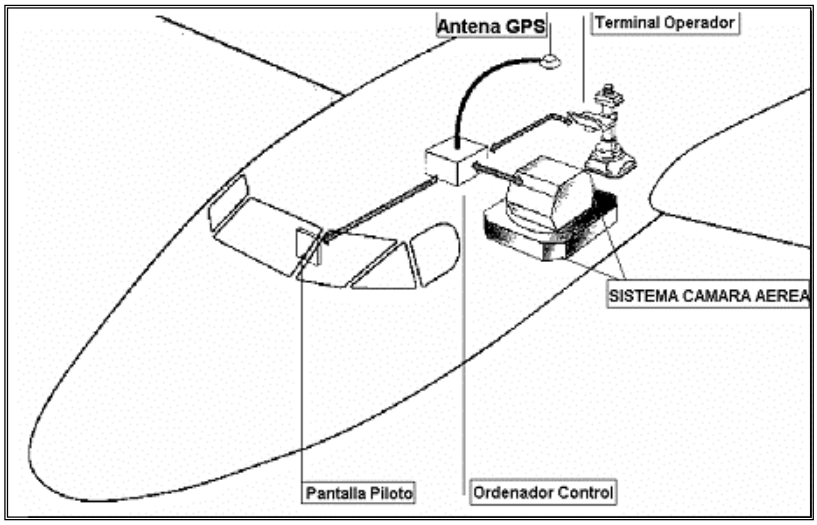


Figura 9. Configuración de GPS aerotransportado

31. 5. Técnicas de levantamiento GPS en vuelo

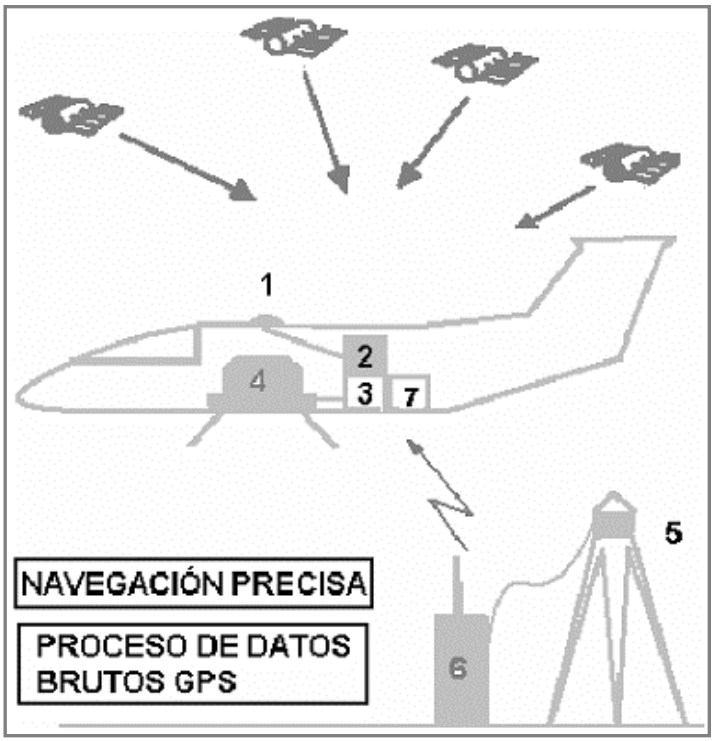
En la figura 9 se muestra la configuración necesaria en un vuelo asistido con receptores GPS, para la obtención de los centros de proyección y navegación asistida. Durante el vuelo la cámara emite una señal que registra con el tiempo GPS del momento del disparo, gestionado por el ordenador de control. Este tiempo sirve par a realizar la interpolación la posición del centro de proyección en los cálculos posteriores a partir de las posiciones del GPS de vuelo antes y después del disparo, normalmente el registro GPS se realiza con intervalos de 1 seg o mejores como 0.5 o 0.3 seg, de acuerdo con las necesidades del proyecto y escala de levantamiento.

El posicionamiento (obtención de las coordenadas de la antena del equipo GPS) se realiza de los modos siguientes:

1. Posicionamiento solución navegación (escalas medias y pequeñas). Se utiliza el posicionamiento absoluto en tiempo real con pseudodistancias (navegación). Se utiliza sólo código, precisión métrica (código P o código C/A). Se pueden alcanzar precisiones propias del GPS actualmente sin disponibilidad selectiva
2. Navegación precisa (escalas grandes) Posicionamiento relativo (PR), en tiempo real, se reciben correcciones en tiempo real vía radio, por un sistema del tipo Omnistar o Racal por ejemplo

3. Levantamiento cinemático con solución precisa de navegación

   En la figura 10 se presentan los equipos y configuración necesaria en un levantamiento cinemático con navegación precisa (grandes escalas)



1 ANTENA GPS
2 RECEPTOR GPS
Código C/A y FASE
3 SISTEMA NAVEGACIÓN
4 CÁMARA AÉREA
5 GPS REFERENCIA
Coordenadas conocidas
6 RADIO TRANSMISOR
7 RADIO RECEPTOR

EXACTITUD OBTENIDA:

NAVEGACIÓN ± 5 m
FOTOCENTROS ± 0.5 m

Figura 10. Equipos y configuración en un levantamiento cinemático

4. GPS diferencial en tiempo real absoluto (se utiliza código, ppseudodistancias). Se necesita el uso simultáneo de dos receptores, situados en ambas estaciones. El Posicionamiento Relativo mediante códigos (C/A, P) se denomina con el nombre de DIFERENCIAL GPS [DGPS], proporciona precisión métrica en las coordenadas medidas con código C/A o submétricas con código P.

Condiciones del vuelo cinemático con pseudodistancia y fase

Necesita dos receptores, uno permanece fijo como estación base [EB], se sitúa sobre una señal de coordenadas ETRS89 conocidas, otro se desplaza sin perder nunca a cuatro satélites de vista. Solo necesita la fase L1, calcula los incrementos de coordenadas entre las distintas posiciones. Con GPS cinemático solo se alcanza en la actualidad precisiones por debajo del medio metro con posicionamiento relativo a partir de la fase de la portadora, aplicando el método GPS de cálculo de dobles diferencias, en levantamientos cartográficos de escalas medias. En aplicaciones fotogramétricas con GPS cinemático se determinan coordenadas tridimensionales de los centros perspectivos de las cámaras en vuelo en el instante de cada exposición, con precisiones compatibles

con las necesidades de los levantamientos fotogramétricos a diversas escalas. Estas coordenadas de la cámara se utilizan como puntos de control aéreo (apoyo aéreo cinemático) en el ajuste combinado de la aerotriangulación, reduciéndose los puntos de control.

Se utiliza normalmente un receptor aéreo de doble frecuencia (portadoras L1 y L2, moduladas por el código P y C/A). Se producen registros de una época cada 0,5 segundos o 1 segundo. El proceso de cálculo, en oficina técnica, de las observaciones registradas supone determinar con precisión la posición de la cámara en el instante de cada toma, reduciéndose significativamente el número de puntos de apoyo necesarios en la fase de aerotriangulación y, en consecuencia, el coste del producto fotogramétrico y cartográfico.

El programa de cálculo determina los centros de fase de la antena del receptor móvil respecto de la estación fija o de referencia para cada época. El cálculo se realiza por pasadas, fijando para cada una de ellas ambigüedades aproximadas calculadas a partir de una posición del receptor móvil por medidas sobre código diferencial. Fijadas unas ambigüedades aproximadas, supuestamente constantes a lo largo de la pasada, se determina la solución precisa sobre las medidas de fase de la frecuencia L1, aplicando distintas técnicas como las basadas en el filtro Kalman que usa todos los observables GPS disponibles o cualquier combinación, los resultados mejores se obtienen combinando dos soluciones independientes calculadas hacia delante y hacia atrás de la pasada.

Las condiciones a tener en cuenta en un apoyo aéreo cinemático relativo por GPS, soluciones del ACB (*Fritz Ackermann, ITC Journal, 1992*)

- Modelado y eliminación de errores sistemáticos con parámetros de deriva
- Es básica la posición de un receptor en tierra de coordenadas conocidas ETRS89
- Rango de operación del avión hasta 400 Km de distancia respecto de la referencia
- Posicionamiento de la cámara del orden de dm. o metros
- Solución offset de antena a posteriori durante el ajuste
- Tiempos de exposición: intervalos de 1 seg a 0,3 seg . El receptor debe poder hacer medidas a intervalos de un segundo, o medio segundo pues el avión normalmente marcha a

una velocidad de unos 250 km/h (o a 575 km/h para escala media) lo que equivale a 70 m/s (o 160 m/s), y después será necesario interpolar para el instante de la toma de la cámara

- Es fundamental resolver la ambigüedad de fase inicial previamente al posicionamiento cinemático. La indeterminación en la fijación de ciclos: un error de 1 o 2 ciclos genera del orden de 0,5 metros de error después de 15 minutos de vuelo, dependiendo de la distancia entre receptores (Schade, 1992)

- Tener muy en cuenta interrupciones de señal, cambios de ciclos y cambios de constelación.

31.6. Técnicas de levantamiento GPS en fotogrametría

El sistema de posicionamiento GPS en fotogrametría se aplica a la planificación interactiva del vuelo fotogramétrico y al control de su ejecución en tiempo real, por un lado; y al análisis después del vuelo, y determinación de los centros de proyección del instante de toma de cada fotograma, por otro.

Los dos métodos más extendidos en la determinación de la posición de los centros de proyección son:

a) Método OTF *(On-The-Fly*): aplicado y muy popular en Estados Unidos y Canadá
b) Método del Ajuste Combinado de Bloque (ACB) muy popular en Europa y Japón

Método OTF: es un método directo y proporciona la solución de los centros de proyección con una exactitud limitada y baja fiabilidad. Se basa en la determinación precisa de la ambigüedad de ciclos inicial.

Método ACB: es un método indirecto, y proporciona la solución de los centros de proyección con una exactitud que depende del número de puntos de control, además proporciona una aceptable fiabilidad.

CONDICIONES	**AJUSTE COMBINADO DE BLOQUE (ACB)**	**ON THE FLY (OTF)**
RECEPTORES	SIMPLE o DOBLE FRECUENCIA	DOBLE FRECUENCIA
FILOSOFÍA Y PRINCIPIOS	Se resuelven las ambigüedades en el cálculo incorrectamente Errores son aceptados como sistemáticos Son eliminados aplicado la técnica de Ajuste Combinado del Bloque	Las ambigüedades son resueltas correctamente en posproceso de cálculo No se supone la existencia de errores sistemáticos
DISTANCIAS ENTRE ESTACIÓN DE REFERENCIA Y MÓVIL	Hasta 400 Km La estación referencia fija puede estar situada en aeropuerto u oficina	Distancias típicas entre 20 Km hasta 60 Km La estación referencia muy cerca de la zona de vuelo Un proyecto de gran extensión necesita varias estaciones que cubran completamente la zona
APLICABILIDAD	Adecuado en zonas donde es difícil situar los la referencia fija durante el vuelo	Zonas accesibles para colocar las estaciones de referencias necesarias
CONTROL TERRENO	Al menos un punto de control (X, Y, Z) en cada esquina del bloque	Puntos de Chequeo (X,Y,Z)
PASADAS TRANSVERSALES	Pasadas Transversales en los extremos del bloque, o también control altimétrico	No son necesarias
EXACTITUDES OBTENIDAS	Del orden < 50 cm	Del orden < 15 cm

Tabla 2. Comparación del método ACB y OTF

Está perfectamente comprobado que la resolución incorrecta de las ambigüedades de ciclos iniciales supone un error sistemático en la determinación de la posición del receptor móvil que puede modelarse por una recta, definida por los parámetros de deriva del Ajuste Combinado del

Bloque en aerotriangulación. El problema del datum o transformación de sistemas de referencia de trabajo es otro factor a tener en cuenta en el ajuste combinado. El GPS cinemático proporciona coordenadas tridimensionales de la antena en el sistema de referencia GPS (ETRS89) lo que supone una gran ventaja en fotogrametría, por lo que es necesaria la transformación del sistema de coordenadas GPS de la antena al sistema de trabajo local, que es lo mismo que la transformación de un sistema de referencia satélite a un sistema de referencia geodésico, esta transformación entre los distintos sistemas de trabajo produce un error sistemático que hay que tener en cuenta en el ajuste.

Es fundamental al plantear el modelo de ajuste estudiar y considerar los errores sistemáticos propios del sistema de los satélites (parámetros orbitales, desconocimiento del campo de la gravedad terrestre), además de los sistematismos propios del sistema geodésico local obtenido con medidas angulares clásicas normalmente.

31.7. Ajuste combinado de aerotriangulación con GPS en el método de haces (modelo matemático)

El método para integrar datos GPS en el ajuste de bloque fotogramétrico por haces (igualmente aplicable al método de ajuste por modelos independientes) es simple. Tiene similitud con la integración de datos obtenidos con estatoscopio y datos APR. Los datos GPS implican extender el modelo matemático para integrar estas observaciones en los datos del bloque. Esto introduce parámetros incógnitas adicionales (errores sistemáticos adicionales)

Las posiciones GPS de los centros proyectivos son preprocesados y transformados al sistema de coordenadas local, estos datos se relacionan con los datos del bloque fotogramétrico mediante una transformación polinómica. Los parámetros de esta transformación se consideran como incógnitas a ser determinadas en un ajuste combinado.

El modelo fotogramétrico integrado o combinado supone considerar dos modelos matemáticos fundamentales. Por un lado el modelo matemático linealizado del ajuste por haces de un bloque fotogramétrico con parámetros adicionales que toman la forma

$$v_x = A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + \quad \bullet \quad - l_x$$

Las incógnitas son, x_1 los parámetros de la orientación exterior, x_2 corrección de las coordenadas terreno de los puntos de paso, y x_3 los parámetros adicionales de la autocalibración. La matriz A_3 se determina linealizando el modelo funcional de autocalibración elegido, l_x es el vector de constantes de observación fotogramétrica (coordenadas placa medidas) y υ_x el vector de errores residuales.

Igualmente se plantean las ecuaciones de observación correspondientes a las coordenadas de control terreno en la forma

$$v_c = \quad \cdot \quad + \overline{A}_2 x_2 + \quad \cdot \quad + \quad \cdot \quad - l_c$$

A continuación se plantean las ecuaciones de observación de las coordenadas GPS de los centros proyectivos como

$$\begin{aligned} X_{ik}^{GPS} + v_{x_{ik}} &= X_{ik}^{CP} - (a_{0k} + a_{ik} \cdot \overline{x}_{ik}) \\ Y_{ik}^{GPS} + v_{y_{ik}} &= Y_{ik}^{CP} - (b_{0k} + b_{ik} \cdot \overline{y}_{ik}) \\ Z_{ik}^{GPS} + v_{z_{ik}} &= Z_{ik}^{CP} - (c_{0k} + c_{ik} \cdot \overline{z}_{ik}) \end{aligned}$$

X^{GPS}, Y^{GPS}, Z^{GPS} son las coordenadas GPS de la cámara correspondiente a la estación o toma i en la pasada k. Los términos X^{CP}, Y^{CP}, Z^{CP} son las incógnitas de las estaciones de la cámara (coordenadas desconocidas de los Centros Proyectivos).

Los términos lineales (parámetros de deriva correctores del sesgo) proporcionan la transformación en el sistema de coordenadas del bloque; (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) es la distancia de la estación inicial a la cámara i en el momento de la toma respecto del primer centro perspectivo, igualmente se puede plantear la ecuación en función del tiempo (t_{ik}, t_{ik}, t_{ik}); $(a_{0k}, b_{0k}, c_{0k})^T$ son los parámetros incógnitas del término constante en la pasada k (corrección por traslación); $(a_{ik}, b_{ik}, c_{ik})^T$ son los parámetros incógnitas del término lineal en la pasada k (corrección por inclinación). La interpretación geométrica de los parámetros de deriva supone considerar tanto "a" como "b" parámetros de una línea recta igual que se describen en un ajuste combinado con datos GPS.

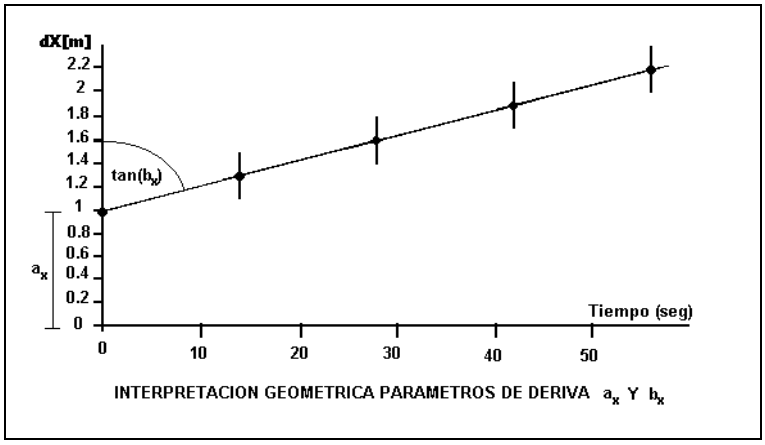


Figura 11. Interpretación geométrica de los parámetros de deriva

La figura 11 muestra que el parámetro constante a_x es la intersección del perfil de la pasada con el eje- $dX = X_{CP}^{GPS} - X_{CP}^{AT}$. El mismo razonamiento se aplica a las demás coordenadas. El término lineal b_x describe la inclinación del perfil. Las barras de la línea indican la exactitud de las observaciones. La precisión de los parámetros de deriva constantes (a_x, a_y, a_z) como la de los lineales (b_x, b_y, b_z) depende del número de observaciones y de la exactitud de estas observaciones. En principio, los largos perfiles son mejores que los perfiles cortos, aunque no sin ciertas limitaciones. Se recomienda, de todas formas, no realizar perfiles de más de 30 minutos.

Para cada perfil GPS las ecuaciones de observación planteadas suponen aplicar una transformación al vector $\left(X_{CP}^{GPS}, Y_{CP}^{GPS}, Z_{CP}^{GPS}\right)$ de forma que se sitúe en una mejor posición en el bloque. Estos parámetros lineales se calculan simultáneamente junto a los parámetros de orientación externa y las coordenadas incógnitas de los puntos de control en una estimación mínimos cuadrados. Los parámetros lineales de deriva, tanto para las posiciones como para los ángulos, se interpretan como parámetros de orientación de los perfiles GPS, y modelan los errores sistemáticos producidos en el levantamiento integrado.

La transformación por traslación incluye la excentricidad de la cámara y la antena GPS. Igualmente se pueden definir los términos lineales de los parámetros de deriva como función del tiempo. Los parámetros de deriva modelan los sistematismos propios de la trayectoria GPS cinemática por pasadas, en estas condiciones las correcciones se aplican independientemente para cada pasada del bloque.

31.7.1. Ecuaciones de observación en el ajuste combinado por haces

La forma general de las ecuaciones de observación en el ajuste combinado serán

$$\upsilon_x = A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 + \bullet - l_x \qquad 1$$

$$\upsilon_c = \bullet + \overline{A}_2 x_2 + \bullet + \bullet - l_c \qquad P^C$$

$$\upsilon_{GPS} = \overline{A}_1 x_1 + \bullet + \bullet + A_4 x_4 - l_{GPS} \qquad P^{GPS}$$

Incógnitas en el ajuste combinado por haces.

x_1 parámetros incógnitas de la orientación exterior.

x_2 correcciones de las coordenadas en el sistema terreno de los puntos de control y de paso.

x_3 parámetros adicionales de la autocalibración (f, Δx_0, Δy_0) correcciones a los elementos de orientación interna y parámetros de corrección de sistematismos.

x_4 parámetros de transformación de los datos GPS.

Observaciones en el ajuste combinado

l_x vector de constante de observación de coordenadas imagen.

l_C vector de constantes de observación de coordenadas de control terreno.

l_{GPS} vector de constantes de observación de coordenadas GPS

Los correspondientes vectores de los errores residuales son υ_x, υ_C, υ_{GPS}.

En notación matricial las ecuaciones de observación se escriben como

$$\begin{vmatrix} \nu_x \\ \nu_C \\ \nu_{GPS} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & \cdot \\ \cdot & \overline{A}_2 & \cdot & \cdot \\ \overline{A}_1 & \cdot & \cdot & A_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} l_x \\ l_C \\ l_{GPS} \end{vmatrix}$$

La resolución mínimos cuadrados nos implica introducir el modelo estocástico, tendremos en cuenta que las observaciones son de diferente tipo, lo que nos lleva a considerar las respectivas matrices de pesos de las observaciones. En nuestro caso definimos la matriz de peso unidad para las observaciones fotogramétricas, la matriz de pesos P^C correspondiente a los puntos de control y P^{GPS} de las observaciones GPS.

En este modelo estocástico sencillo suponemos que los tres grupos de observaciones son incorreladas, e igualmente suponemos que tiene la misma varianza a priori de la unidad de peso. En forma simplificada se escriben las ecuaciones de observación

$$\hat{\nu} = \overline{A} \cdot \overline{x} - \overline{l}$$

La estructura de las ecuaciones normales aplicada a la estimación mínimos cuadrados queda de la forma siguiente

$$N = \begin{vmatrix} N_{x_1x_1} & N_{x_1x_2} & N_{x_1x_3} & N_{x_1x_4} \\ N_{x_2x_1} & N_{x_2x_2} & N_{x_2x_3} & N_{x_2x_4} \\ N_{x_3x_1} & N_{x_3x_2} & N_{x_3x_3} & N_{x_3x_4} \\ N_{x_4x_1} & N_{x_4x_2} & N_{x_4x_3} & N_{x_4x_4} \end{vmatrix}$$

Donde cada elemento de la matriz es

$$N_{x_1x_1} = A_1^T A_1 + \bar{A}_1^T P^{GPS} \bar{A}_1 \quad ; \quad N_{x_1x_2} = A_1^T A_2 \quad ; \quad N_{x_1x_3} = A_1^T A_3 \quad ; \quad N_{x_1x_4} = \bar{A}_1^T P^{GPS} A_4$$

$$N_{x_2x_2} = A_2^T A_2 + \bar{A}_2^T P^C \bar{A}_2 \quad ; \quad N_{x_2x_3} = \bar{A}_2^T A_3 \quad ; \quad N_{x_2x_4} = 0$$

$$N_{x_3x_3} = A_3^T A_3 \quad ; \quad N_{x_3x_4} = 0 \quad ; \quad N_{x_4x_4} = A_4^T P^{GPS} A_4$$

31.7.2. Precisión del ajuste combinado por haces de rayos

El método de triangulación aérea descrito proporciona una gran estabilidad de cálculo particularmente en la dirección de la pasada. El ajuste combinado proporciona una gran estabilidad altimétrica del bloque siempre y cuando se distribuyan o bien puntos de control altimétrico en el contorno del bloque o bien pasadas transversales al principio y final de pasadas, según se puede observar en la siguiente figura

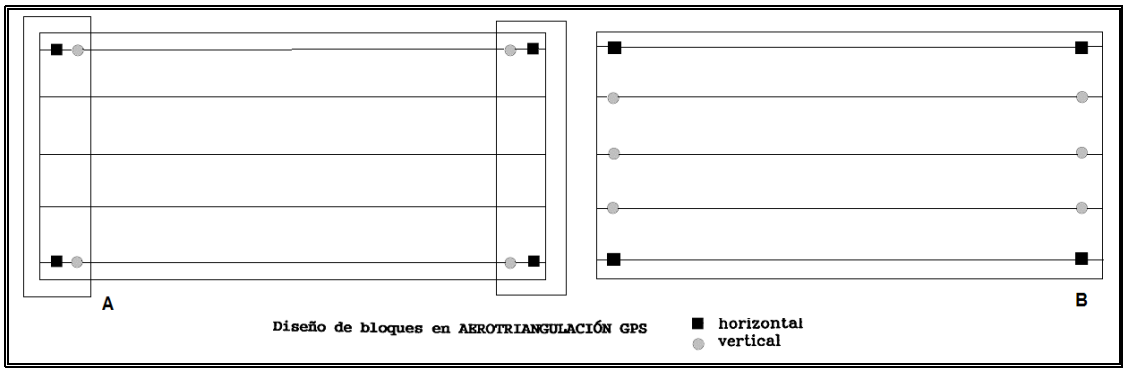


Figura 12. Diseño de bloques de aerotriangulación

Conseguimos un sistema geométrica y numéricamente estable, mediante tres estrategias en el diseño del bloque. [*Application of GPS for aerial triangulation (F.Ackermann, H. Schade PERS, November, 1993)*]

- Recubrimiento transversal del 60%.
- Dos cadenas de puntos de control vertical, en el inicio y final del bloque.
- Dos pasadas transversales al comienzo y final del bloque.

Por razones de confianza y fuerte estabilidad del bloque, se aconseja apoyar las pasadas transversales con pares de puntos al principio y final de estas pasadas. También es necesario apoyar las grandes pasadas, cada cierto tiempo o distancia, con pasadas transversales o apoyo terrestre altimétrico transversal. Si se consigue determinar las ambigüedades iniciales de ciclos es posible reconstruir la trayectoria de un receptor GPS embarcado en un avión con una precisión decimétrica y, por tanto, después aplicar la corrección de un vector de excentricidad de antena GPS. Por otro lado Ackermann he obtenido, por experiencias de simulación, las exactitudes en los bloques de aerotriangulación con GPS, según la figura anterior, siguientes.

a) Para un bloque con puntos de control altimétrico transversales al principio y final del bloque las exactitudes son

$$\sigma_{X,Y} = \pm 2.1 \cdot m_f \cdot \sigma_0$$
$$\sigma_Z = \pm 2.3 \cdot m_f \cdot \sigma_0$$

b) En bloques con pasadas transversales al principio y final del bloque se obtiene

$$\sigma_{X,Y} = \pm 1.5 \cdot m_f \cdot \sigma_0$$
$$\sigma_Z = \pm 2.0 \cdot m_f \cdot \sigma_0$$

Donde σ_0 es la exactitud de las coordenadas imagen medidas, normalmente se considera el error medio cuadrático de la unidad de peso del ajuste por haces. Por último se muestra en la siguiente tabla el flujo de datos en un cálculo de Aerotriangulación con datos GPS o ajuste combinado del bloque

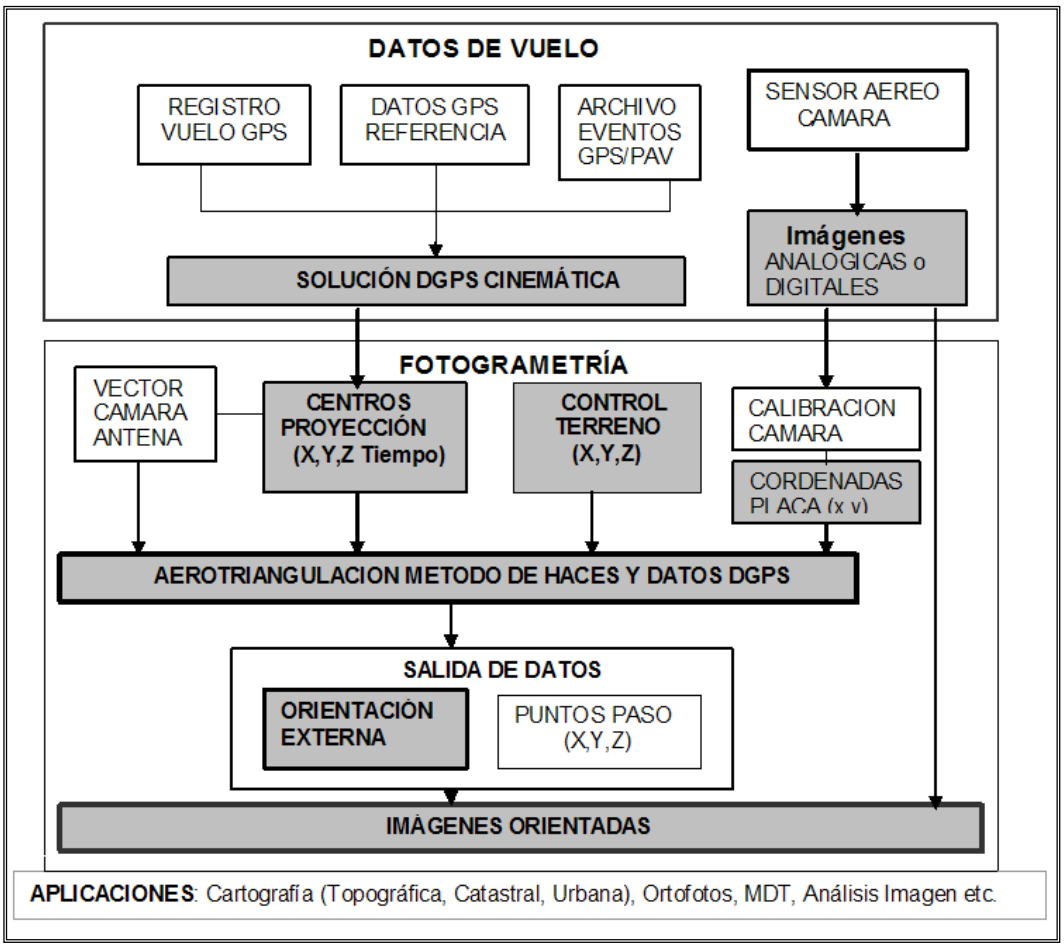


Figura 13. Flujo de datos en aerotriangulación con GPS

Bibliografía

[1] Ackermann F., Schade H. 1993 Aplication of GPS for aerial triangulation. PERS

[2] Albertz J., Kreiling W. 1989. Manual fotogramétrico. Herbert Whichmann Verlag. Karlsruhe.

[3] Jekeli Christopher. 2001. Inertial Navigation System with Geodetic Applications. Berlin; NewYork De Gruyter

[4] Kraus, K. 1993. *Photogrammetry* Vol. 1. Dummlers Verlag. Bonn.

[5] Kraus, K. 1997. Photogrammetry Vol. 2. Dummlers Verlag. Bonn.

[6] Papí, F., González, E., Abad, P. (2000). Aerotriangulación con datos GPS en el Instituto Geográfico Nacional. VII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía. Madrid

[7] Papí, F y otros, P. (2003). Curso de Referenciación de Imágenes Aéreas. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento Madrid

[8] Sevilla M. J. y otros. 1993 Curso de Fotogrametría y GPS Instituto de Astronomía y Geodesia (UCM)

[9] Slama Ch.C. 1980. Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry. ASPRS

[10] Sanjib K. Ghosh. 1988. *Analitical Photogrammetry*. Pergamon Press.

[11] Wang, Z. 1990. Principles of Photogrammetry. Pres of Wuhan Techn. Univ. of Surveying and Mapping. Pekin

[12] Wolf. 1983. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill.

[13] Moffit F. H., Mikhail E. M.1980 *Photogrammetry*. Edt, Harper and Row. New York.

[14] PATB-NT_Tutorial

Tema 32. Georreferenciación de imágenes aéreas. Modelo geométrico de la georreferenciación directa. Componentes del sistema integrado DGPS/IMU. Subsistema de posicionamiento cinemático GPS. Subsistema unidad de medidas inerciales (IMU). Integración del sistema DGPS/INS. Formulación del filtro Kalman. Ventajas y desventajas de la integración DGPS/INS.

32.1. Georreferenciación de imágenes aéreas

El término de imagen georreferenciada en fotogrametría surge de la combinación de dos desarrollos de ingeniería: la navegación de precisión, con sensores GPS e Inerciales, que resuelve el problema de la orientación externa de imágenes aéreas sin acudir a soluciones de ajuste de bloque, y los desarrollos de las cámaras digitales que integradas con los sensores de navegación simplifican las tareas de orientación en fotogrametría.

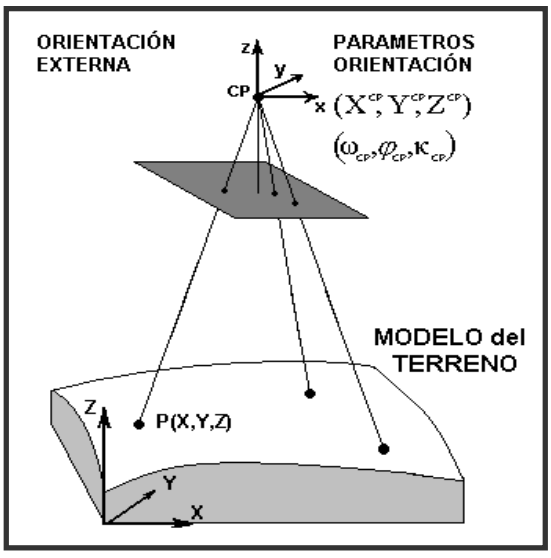


Figura 1.

Esto significa que cada imagen, ya sea analógica o digital, viene definida por sus parámetros de orientación, y esta orientación viene definida su vez por la orientación interior (OI) y la orientación exterior (OE) del sensor imagen. Los parámetros que definen la orientación exterior son las coordenadas espaciales del centro perspectivo y las tres rotaciones del sistema de referencia imagen

Por tanto, la determinación de los parámetros de orientación exterior es un requisito esencial para la evaluación geométrica de cualquier clase de imagen fotográfica en proyectos fotogramétricos y cartográficos.

Concepto de georreferenciación de imágenes aéreas

El concepto de imagen georreferenciada, como unidad fotogramétrica básica, implica que cada imagen viene definida con sus parámetros de orientación, es decir, tres posiciones espaciales en el espacio Objeto y tres rotaciones en el sistema de referencia imagen, de forma que puede combinarse con cualquier imagen georreferenciada del nuevo escenario mediante el empleo de técnicas geométricas, como por ejemplo el ajuste espacial de objetos o la geometría epipolar, tarea propia de la restitución de imágenes.

Debemos señalar la necesidad de contar con un segundo fotograma o información adicional del modelo del terreno si queremos reconstruir un objeto en el espacio tridimensional a partir de un fotograma aislado.

Modelo geométrico básico de la fotogrametría

En fotogrametría (analítica o digital) la trayectoria de cada rayo de luz puede describirse por una expresión matemática (ecuación de colinealidad) función de la posición de un punto en el espacio objeto, posición de un punto del plano imagen y posición del centro de proyección del sistema imagen o sensor en el sistema de referencia terreno, dirección del eje óptico de la cámara y geometría perspectiva de la cámara.

Los posteriores desarrollos matemáticos de la fotogrametría analítica, y actualmente la digital, están basados en la hipótesis de que la cámara produce una proyección central perfecta del objeto, esto nos lleva a considerar que el conjunto de las lentes de la cámara pueden suponerse como un punto y los rayos de luz que surgen desde cualquier punto objeto forman una imagen de tal forma que los puntos objeto, imagen y el centro óptico de la lente son colineales.

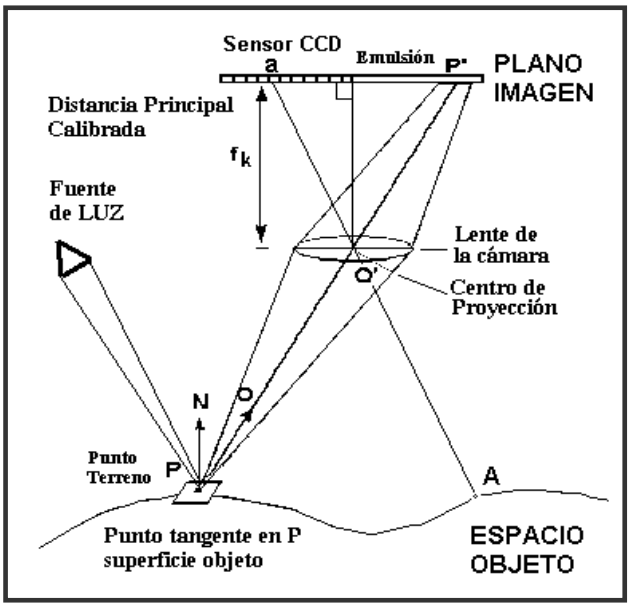


Figura 2.

Concluyendo, diremos que en la georreferenciación de imágenes aéreas (incluso terrestres) se debe determinar la orientación INTERNA y EXTERNA para cada fotograma, esto nos permitirá establecer las coordenadas tridimensionales de los objetos visibles en las imágenes. Esto supone, por tanto, determinar una serie de parámetros que definan, independientemente, la orientación interior y exterior de cada una de las imágenes aéreas, la técnica más común para determinar la Orientación Externa es la Aerotriangulación.

Métodos de georreferenciación de imágenes

En la actualidad se dispone de dos soluciones básicas al problema de la georreferenciación de imágenes o sus combinaciones. Podemos clasificar la determinación de la orientación externa (OE) de fotogramas aéreos en un proyecto fotogramétrico de acuerdo a dos métodos diferentes

- MÉTODO INDIRECTO

Los parámetros se determinan indirectamente, aplicando condiciones geométricas de correspondencia que ligan la posición de puntos en el espacio objeto (control terreno) y puntos en el espacio imagen (fotocoordenadas).

El caso más sencillo es el de una imagen o fotograma aislado, el proceso de orientación externa se obtiene por intersección espacial y su generalización supone aplicar la técnica de Aerotriangulación a un bloque de fotogramas. En este caso los parámetros de orientación externa de los

centros perspectivos de cada imagen se estiman aplicando un ajuste de bloque según el modelo matemático de haces.

Cada bloque de imágenes da lugar al canevás de puntos de paso y enlace, contando en todo momento con un número suficiente de puntos de control terreno, que se utilizan en el cálculo del bloque, se obtienen los puntos terreno suficientes para la materialización de las orientaciones absoluta o externa en el proceso de restitución numérica.

- MÉTODO DIRECTO

Pretende la determinación de la posición del centro proyectivo de la cámara y los ángulos (orientación) que definen la posición de la imagen en el instante de toma durante el levantamiento aéreo. Esto se consigue integrando la tecnología satélite GPS e inercial INS *(Inertial Navigation System)*.
El modelo de ingeniería integrado que está compuesto por un sensor GPS *(Global Positioning System),* que proporciona la posición del sistema sensor a referenciar, una unidad de medidas inerciales IMU *(Inertial Measures Unit),* que proporciona las orientaciones, un sistema de almacenamiento y por un ordenador.

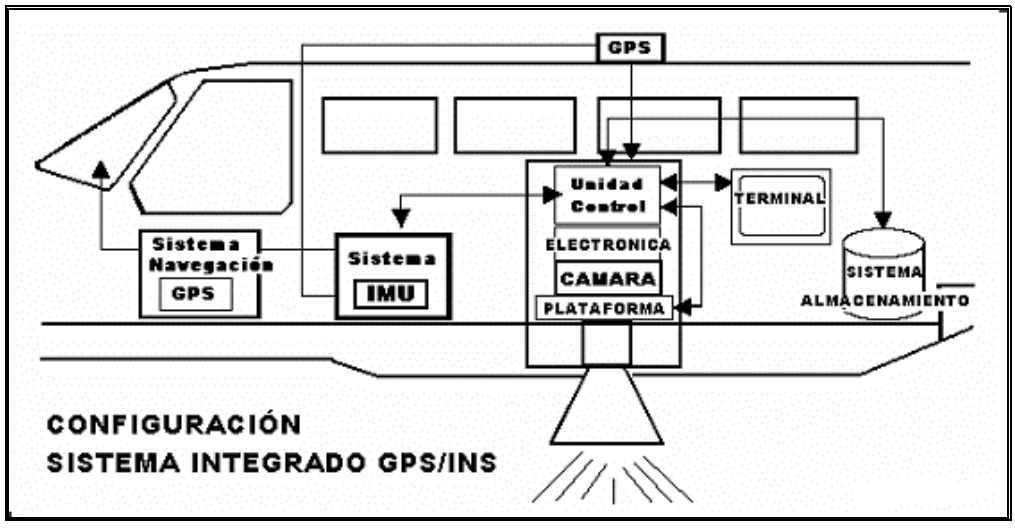


Figura 3. Configuración del sistema integrado GPS/INS

Orientación directa con datos DGPS/INS de sensores

No es nuevo el proyecto de orientar las imágenes fotográficas de forma directa a partir de datos de navegación aérea en las tareas fotogramétricas. Ackermann en el año 1984 ya apuntaba la posibilidad y las condiciones que debería cumplir un levantamiento aerotransportado para conseguir este propósito.

En los últimos años se viene orientando de forma directa distintos sensores, midiendo instantáneamente la posición, velocidad y ángulos de orientación de imágenes obtenidas con sensores sobre una plataforma aérea o móvil. La orientación de sensores aparece en la literatura fotogramétrica con el sinónimo de georreferenciación directa en estos casos se determinan los parámetros que describen la posición del sensor en el espacio. El concepto de orientación directa normalmente se considera que es más general que el término georreferenciación directa.

El sistema integrado GPS/IMU ha tenido ya aplicación en el campo de la orientación directa de sensores imagen como los escáneres *PUSHBROOM* o barredores, y en la orientación de sensores activos como los altímetros láser o sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging*), sistemas SAR *(Synthetic Aperture Radar*) e InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar)*. Igualmente se están aplicando en los sistemas de adquisición de información geográfica de cartografía móvil.

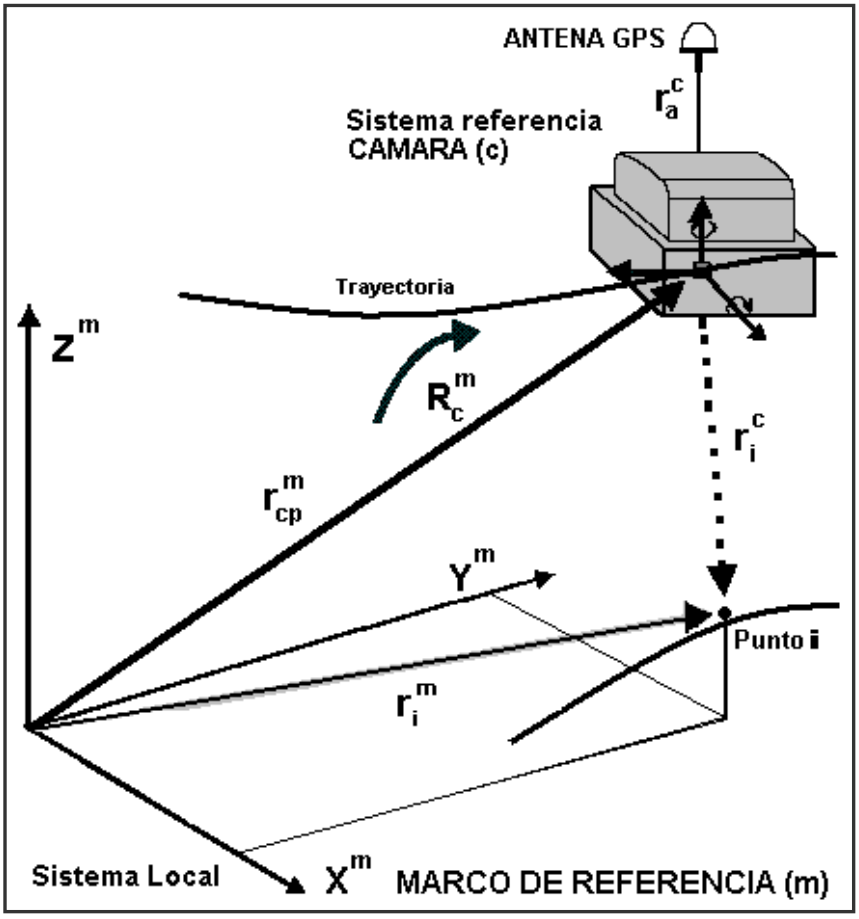
32.2. Modelo geométrico de la georreferenciación directa

La georreferenciación directa supone determinar en cualquier instante de tiempo (t) la posición del centro proyectivo de la cámara aérea (o de cualquier otro sensor imagen) en el sistema de referencia local o marco de referencia (m), es decir definir la trayectoria del vector $\mathbf{r}_{cp}^{m}(t)$ y la matriz de rotación $\mathbf{R}_{c}^{m}(t)$ del sistema de referencia de la cámara (c) al sistema de coordenadas de referencia local (m).

La ecuación que define la trayectoria de la cámara en el tiempo se escribe como

$$\mathbf{r}_{i}^{m} = \mathbf{r}_{cp}^{m}(t) + \lambda_{i} \cdot \mathbf{R}_{c}^{m}(t) \cdot \mathbf{r}_{i}^{c} \qquad (1)$$

En realidad es la ecuación de colinealidad, supone una transformación tridimensional 3D del vector del punto i en el sistema de referencia de la cámara (c) al vector 3D del punto i en el sistema de referencia local u oficial (m)



VECTOR PUNTO i SISTEMA TERRENO

$$r_i^m(t) = (X_i^m, Y_i^m, Z_i^m)$$

VECTOR CENTRO PERSPECTIVO

$$r_c^m(t) = (X_c^m, Y_c^m, Z_c^m)$$

VECTOR PUNTO i SISTEMA IMAGEN (

c) $r_i^c = (x_i^c, y_i^c, f^c)$

MATRIZ ROTACION de (c) a (m): $R_c^m(t)$

FACTOR ESCALA λ_i

TIEMPOO ÉPOCA OBSERVACIÓN (t)

VECTOR CÁMARA ANTENA

$$r_a^c = (x_a^c, y_a^c, z_a^c)$$

Figura 4.

La ecuación es la forma más simple de georreferenciación directa, esto implica o supone que las coordenadas del centro perspectivo de la imagen pueden determinarse directamente. Relaciona puntos en el plano imagen con puntos en el sistema terreno.

Esto en realidad no es tan directo porque la posición de la antena cinemática GPS de la cámara no coincide con el centro perspectivo, origen de referencia del sistema de la cámara, está situada sobre ella. Si conociéramos el vector entre los dos centros (centro de fase de la antena GPS y centro perspectivo del sensor) dado por el vector cámara-antena, la ecuación más general se escribe entonces

(2)

$$r_i^m = r_{cp}^m(t) + R_c^m(t)\left(\lambda_i \cdot r_i^c(t) - r_a^c\right)$$

El vector cámara-antena puede medirse por calibración antes de la misión de vuelo directamente por métodos topográficos.

Si consideramos el sistema integrado GPS/INS, el vector entre el origen del sistema de coordenadas de referencia (b) correpondiente al sistema inercial y el de la cámara (c) se expresa en el sistema de coordenadas (b), ver en siguiente figura 5, como

(3) $$r_{cp}^{m}(t) = r_{INS}^{m}(t) + R_{b}^{m}(t) \cdot r_{c}^{b}$$

$r_{INS}^{m}(t)$ Vector de coordenadas interpoladas del sistema inercial en el sistema de coordenadas de referencia (m) en el instante t. Vector que resulta de la integración de los sistemas Inercial y GPS.

r_{c}^{b} Vector constante entre el centro perspectivo de la cámara y el centro del sistema de coordenadas (b) del sistema inercial, determinado por calibración general antes del trabajo.

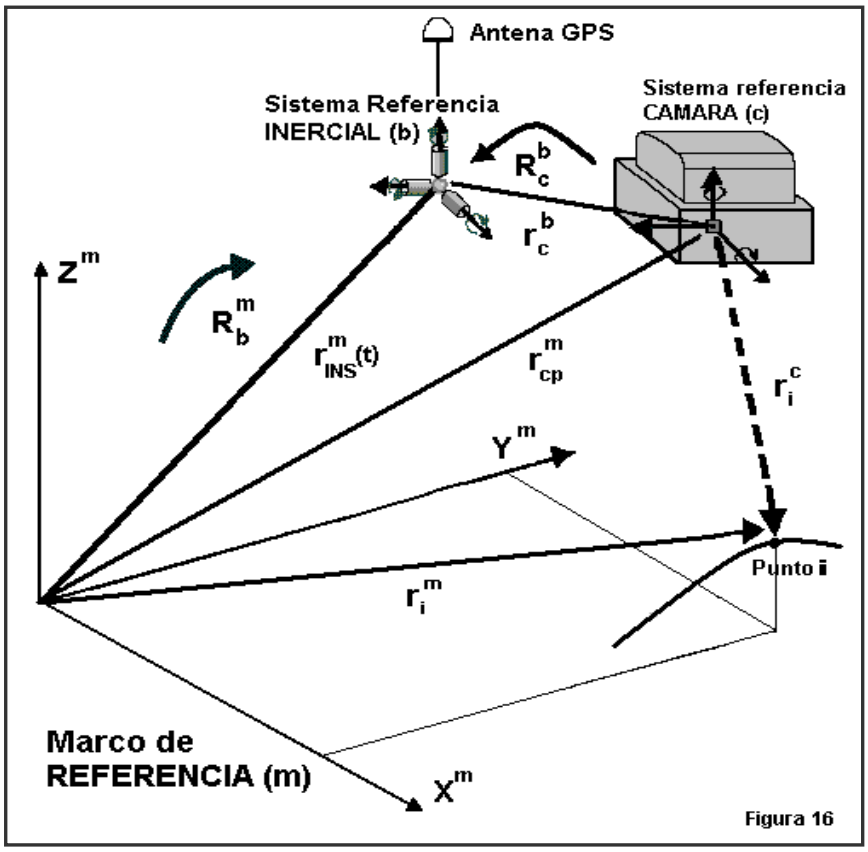


Figura 16

Además de las transformaciones por traslación entre sensores, hay también que tener en cuenta las rotaciones entre los sistemas de referencia cámara, inercial y cartográfico. El sistema (b) inercial no está alineado con el sistema de la cámara (c). Las constantes de rotación entre los

dos sistemas de coordenadas dado por la matriz de giro del sistema cámara (c) al sistema inercial (b) se obtiene por calibración.

(4) $$\mathrm{R}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{m}}(\mathrm{t}) = \mathrm{R}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{m}}(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{R}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{b}}$$

Sustituyendo las igualdades [3] y [4] en la expresión $\mathrm{r}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{m}} = \mathrm{r}_{\mathrm{cp}}^{\mathrm{m}}(\mathrm{t}) + \lambda_i \cdot \mathrm{R}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{m}}(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{r}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{c}}$

$$r_i^m = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot r_c^b + \lambda_i R_c^m(t) \cdot r_i^c$$

Reagrupando

$$r_i^m = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot r_c^b + \lambda_i R_b^m(t) R_c^b \cdot r_i^c$$

Obtenemos la **fórmula final general de georreferenciación directa**

$$r_i^m = r_{INS}^m(t) + R_b^m(t) \cdot \left[r_c^b + \lambda_i R_c^b \cdot r_i^c \right]$$

Donde tenemos los siguientes **observables**

r_i^m Vector Incógnita, corresponde a un punto i del terreno en el sistema de referencia cartográfico (m)

$r_{INS/GPS}^m(t)$ Vector posición del Sistema Inercial. Interpolado a partir de las posiciones GPS y del Sistema Inercial en el instante t de exposición.

$R_b^m(t)$ Matriz ortogonal que transforma los vectores del sistema de referencia inercial (b) en el sistema o marco de referencia cartográfico o local. Interpolada a partir de la salida del Sistema Inercial en el instante (t) de exposición.

λ_i Factor de Escala, determinado mediante técnicas estreoscópicas, de escaneado con altímetros láser o modelos digitales del terreno.

R_c^b Matriz que transforma vectores en el sistema de referencia de la cámara (c) en el sistema de referencia inercial (b). Se obtiene por métodos de **calibración**.

$\mathrm{r}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{b}}$ Vector excentricidad entre el sistema de referencia (c) de la cámara y el sistema de referencia Inercial. Se obtiene, igualmente, por procedimientos de **calibración**.

r_i^c Coordenadas imagen de un punto cualquiera i en el sistema de referencia de la cámara aérea o sensor (c).

32.3. Componentes del sistema integrado GPS/IMU

Conocemos que el sistema GPS de navegación proporciona medidas fiables de las posiciones de la cámara aplicando el método de posicionamiento relativo diferencial GPS (DGPS). Con un procesado de observaciones de fase obtenemos precisiones centimétricas, cumpliéndose en todo momento las condiciones de un levantamiento aéreo cinemático y resolviendo ambigüedades iniciales de ciclos con técnicas OTF *(On The Fly)*.

Con la introducción en el sistema aerotransportado formado por la cámara aérea, un equipo GPS y una unidad de medidas inerciales (IMU *Inertial Measurement Unit*) se obtiene un sistema de navegación integrado que, dependiendo de la precisión de las medidas del equipo inercial, permitirá la referenciación directa para aplicaciones cartográficas, tanto en la producción de ortofotos como de pares estereoscópicos orientados. A continuación se muestra un esquema básico de la configuración.

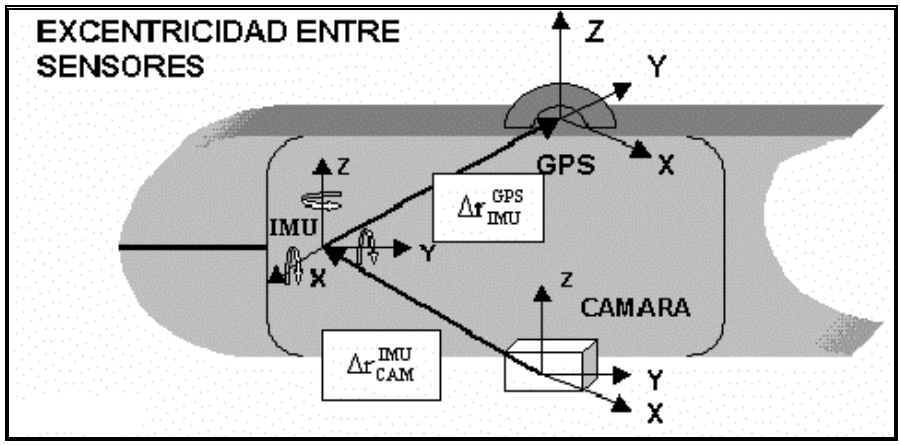


Figura 5. Excentricidad entre sensores

Componentes de un Sistema Integrado de Navegación en Fotogrametría

1) Subsistema Imagen (cualquier sistema sensor)
2) Sistema de Posición y Orientación
    a. Subsistema de Posicionamiento GPS
    b. Subsistema de orientación (ángulos) IMU

32. 3.1 Subsistema de posicionamiento cinemático GPS

La integración del Sistema de Posicionamiento Global GPS en proyectos fotogramétricos es una tarea habitual y asentada. Además de su aplicación en la navegación GPS durante el vuelo y en levantamientos topográficos de puntos de control con equipos y técnicas GPS, la determinación de las coordenadas del centro de proyección como parte de la orientación exterior es una tarea perfectamente madura de cara a su integración en un ajuste combinado de bloques de aerotriangulación.

El subsistema de posicionamiento cinemático GPS está compuesto por el mismo modelo de ingeniería utilizado en la realización de un levantamiento aéreo para la determinación de los centros de proyección de las tomas aéreas. En el problema general de la referenciación directa su objetivo es determinar el vector posición del sensor, para ello es necesario utilizar el método de posicionamiento relativo cuando trabajamos con la tecnología GPS, que permite obtener precisiones inferiores a un metro, trabajando con observaciones de fase y determinando las ambigüedades de ciclos inicial aplicando técnicas *On The Fly* (OTF).

Posicionamiento relativo cinemático GPS

Simplemente plantearemos las condiciones del levantamiento cinemático aplicado en la georreferenciación directa. Básicamente un receptor GPS realiza dos tipos de observaciones: pseudodistancias, a partir de los códigos (C/A, P1, P2) y medidas de la portadora o de fase (fase de la portadora) en las frecuencias L1 y L2 en que opera el sistema. Un receptor GPS es un sensor interferométrico que realiza observaciones elementales comparando una señal que recibe y una réplica generada por el mismo receptor. Ya sea mediante una correlación de la modulación de código o por comparación de fase. Ambos tipos de observaciones proporcionan distancias entre el satélite y el receptor. El ruido que afecta a las observaciones de código está comprendido entre 0.3 - 3m mientras que el ruido que afecta a las observaciones de fase es menor que 0.002m.

Las observaciones de fase de la portadora se ven afectadas por distintos sesgos, entre estos es fundamental resolver el conocido como ambigüedad de ciclos inicial. Existe una ambigüedad por cada satélite, estos sesgos permanecen constantes si se mantiene la recepción de la señal de manera continua.

Además, la exactitud de un levantamiento aéreo cinemático con sensores GPSs (receptor fijo en tierra de coordenadas conocidos otro receptor móvil sobre el avión) depende de la distancia a la

estación de referencia fija de coordenadas conocidas, del tipo o clase de observable utilizado y de la estrategia de cálculo. Los errores producidos por la distancia son el retraso ionósferico y tropósferico y los errores orbitales del sistema espacial. El aumento de la distancia entre el receptor GPS en el avión y el de referencia en tierra hace difícil la resolución de ambigüedades, elemento fundamental para conseguir precisiones del orden de centímetros.

Los errores sistemáticos adicionales en las coordenadas GPS en un levantamiento cinemático se pueden producir por un falso cálculo de ambigüedades fijas, incluso la no resolución de estas ambigüedades, cambios en la constelación de satélites durante el levantamiento aéreo, igualmente pérdidas de señal y de ciclos ocasionan un deterioro de estas exactitudes.

Los programas actuales normalmente consiguen buenos resultados aún en las condiciones difíciles de este tipo de levantamiento aplicando las técnicas OTF (o*n-the- fly*). Generalmente procesan varias estaciones de referencia, varias frecuencias y observables, y combinaciones de ellas. Si se consigue determinar las ambigüedades iniciales de ciclos es posible reconstruir la trayectoria de un receptor GPS embarcado en un avión, o cualquier móvil, con una precisión decimétrica y por tanto, después aplicar la corrección de un vector de excentricidad cámara-antena, conocer la posición de la cámara o sensor en los instantes de toma de las imágenes

Cuando conocemos con precisión la posición de uno de ello receptores, los errores comunes de las observaciones se cancelan aplicando las ecuaciones de observación de dobles diferencias (DD) entre los datos de los satélites y los receptores.

Las ecuaciones de observación no lineales de las dobles diferencias entre las medidas simultáneas de código y fase entre los receptores m, n y los satélites k, l se escriben

$$\Phi_{m,n}^{k,l}(t) = \rho_{m,n}^{k,l} - I_{m,n}^{k,l} + T_{m,n}^{k,l} + \delta m_{m,n}^{k,l} + \lambda N_{m,n}^{k,l} + \varepsilon_{m,n}^{k,l}$$

$$P_{m,n}^{k,l}(t) = \rho_{m,n}^{k,l} + I_{m,n}^{k,l} + T_{m,n}^{k,l} + dm_{m,n}^{k,l} + \lambda N_{m,n}^{k,l} + e_{m,n}^{k,l}$$

Distancia geométrica real entre receptores y posiciones aéreas

$I_{m,n}^{k,l}$ Factor correspondiente al retardo Ionosférico

$T_{m,n}^{k,l}$ Factor correspondiente al retardo Troposférico

$(\delta m, dm)$

(ε, e) Incertidumbre debido a la Multitrayectoria

Factor debido al ruido,

Factor $\lambda N_{m,n}^{k,l}$ correspondiente a la ambigüedad de ciclos para cada fase de la portadora. Si consideramos errores residuales, excepto las ambigüedades, con variables estocásticas, la forma lineal de las ecuaciones de observación DGPS toman la forma matricial

$$D^T \Phi_{i,j} = D^T A_i b_i + \lambda a_j$$

$$D^T p_{i,j} = D^T A_i b_i$$

32. 3.2 Subsistema unidad de medidas inerciales (IMU)

La unidad de medidas inerciales se compone de tres acelerómetros, tres giróscopos y un convertidor y procesador electrónico. Se basan en la medida de la aceleración en dos ó tres ejes para obtener por integración la velocidad y la posición de cualquier punto, conocido el punto de partida. El elemento básico de la IMU (Unidad de Medidas Inerciales) es una plataforma orientada que contiene sensores de aceleración (acelerómetros) y giros (giróscopos). Los giróscopos mantienen estabilizada la plataforma (generalmente en el plano horizontal) y orientada según unas direcciones sobre las cuales se encuentran los acelerómetros. De esta forma se puede medir continuamente aceleraciones a lo largo de los ejes estabilizados, de cuya integración se obtienen valores de posición y velocidad en las correspondientes direcciones donde se miden las aceleraciones. Por un lado estas medidas se definen como tres componentes del vector fuerza aplicado, y las tres de las rotaciones del cuerpo sólido o sistema. Las rotaciones del cuerpo sólido se miden como velocidades angulares respecto del sistema inercial de referencia. Todas las medidas vienen dadas en el marco de coordenadas del sólido.

Según la segunda ley de Newton que describe el movimiento en el campo gravitatorio terrestre (marco de referencia i)

$$\ddot{r}^i = f^i + g^i$$

Donde r es el vector posición, f es la fuerza aplicada o medida y g la gravedad en el marco inercial (i). Considerada la rotación terrestre, la ecuación anterior puede escribirse en el sistema de referencia local (m) por un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden

$$\begin{pmatrix} \dot{r}^m \\ \dot{v}^m \\ \dot{R}_b^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^m \\ R_b^m f^b - (2\Omega_{ie}^m + \Omega_{em}^m) + g^m \\ R_b^m \Omega_{bm}^b \end{pmatrix} \quad (5)$$

Donde m representa el sistema de coordenadas local, r es el vector de posición y v la velocidad, matriz de rotación del sistema inercial (b) el marco local de referencia (m), y es la matriz Ω_{bm}^m sesquilineal de la rotación del cuerpo móvil respecto del marco de referencia local. El sistema inercial precisa una inicialización con los datos de posición cuando la aeronave está en reposo para poder obtener valores de posición. El sistema como tal es autónomo, y por tanto, las soluciones solamente dependen de las características del equipo y no de medios externos que pueden ser degradados deliberadamente o accidentalmente.

Esta unidad de medidas inerciales proporciona siete observables de salida, tiempo, tres ángulos y tres componentes de la velocidad. Las magnitudes obtenidas se transforman a posición, velocidad y actitud y se denominan entonces datos inerciales (INS Inertial Navigation System o Sistema de Navegación Inercial).

Normalmente se monta el sistema inercial cercano a la cámara y la distancia entre ellos, igual que la distancia cámara antena GPS, se determina por taquimetría. Las excentricidades entre el sistema de referencia imagen y el sistema inercial, además del comportamiento de los parámetros de la cámara (longitud focal y distancia principal), pueden determinarse con un vuelo de calibración.

Las principales fuentes de error en el INS son las imperfecciones en los giróscopos y en los acelerómetros y el conocimiento poco preciso del campo gravitacional de la Tierra. Aunque errores del INS pueden crecer ilimitadamente son fácilmente modelables debido a que su frecuencia de registro está muy bien definida.

Las fuentes de error del sistema inercial indispensables para el conocimiento de la integración con el sensor GPS son:

- Sesgos del giróscopo
- Incertidumbre del factor de escala del giróscopo,

- Sesgos del acelerómetro
- Incertidumbres del factor de escala del acelerómetro
- Desalineación o incertidumbre de inclinación de giróscopos y acelerómetros.

El papel del sistema inercial en el conjunto GPS/INS es suministrar medidas casi instantáneas de la aceleración del vehículo para anticipar las variaciones de la señal doppler y construir una entrada en el filtro Kalman del conjunto.

32.4. Integración del sistema GPS/INS. Formulación del filtro Kalman

La integración del sistema GPS e INS se realiza mediante la técnica del Filtro Kalman. El diseño del filtro Kalman es un compromiso entre la teoría y la práctica. El método del filtro descentralizado se considera en el caso que estamos planteando como el más adecuado, por ser simple y flexible, según se muestra en el siguiente esquema.

EL FILTRO KALMAN es un método muy sofisticado de estimación, es una generalización del método de los Mínimos Cuadrados secuencial.

Proporciona un modelado estadístico y precisión numérica de un sistema dinámico. Tiene múltiples aplicaciones en navegación, trabajos geodésicos y topográficos, seguimiento de vehículos (aéreos, espaciales, etc) geología, oceanografía, dinámica de fluidos, estimación demográfica, y la industria.

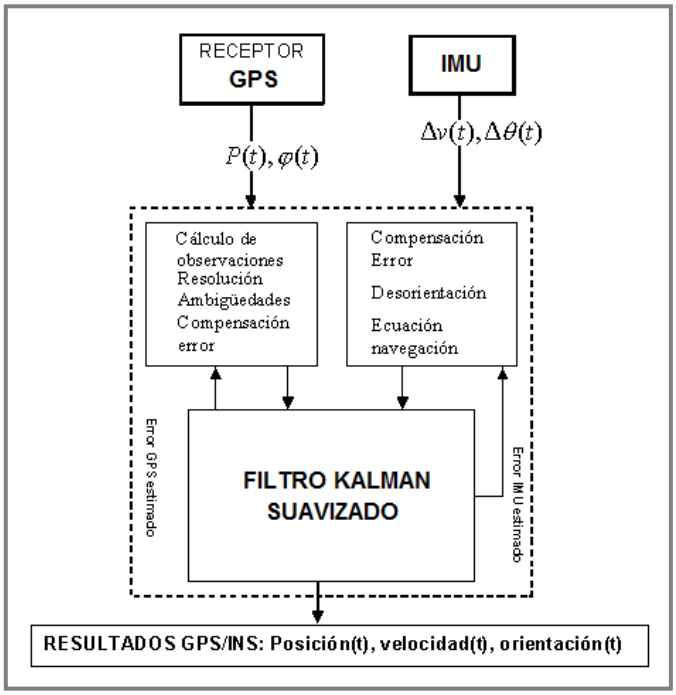


Figura 6. Filtro Kalman

El filtro Kalman es un filtro digital de múltiple entrada y múltiple salida que permite estimar, en tiempo real, el estado de un sistema dinámico basado en el ruido de salida. Después de establecer un modelo dinámico del sistema, la predicción Kalman estima el vector de estado y la matriz de covarianzas del sistema. Cuando disponemos de una medida, la actualización Kalman se utilizará

para calcular más vectores de estado precisos y sus covarianzas. Esto se repite hasta que todos los datos son procesados, según distintas técnicas.

La integración de los datos GPS e Inerciales se realiza aplicado el método Kalman entre otras posibles soluciones. El vector de estado incluye la orientación, posición, velocidad sesgos de la aceleración y derivas del giróscopo

$$X = \left(\omega, \varphi, \kappa, \delta_r, \delta_v, b, d\right)$$

El modelo lineal dinámico del filtro Kalman está formado por la ecuación [5] linealizada y el modelo de errores de los giróscopos y acelerómetros

$$\dot{X} = F \cdot X + W$$

Para medidas discretas expresamos la ecuación

$$X_{k+1} = \Phi_k \cdot X_k + W_k$$

Donde

X = *es el vector de estado del sistema*

W = *es el ruido del sistema*

Φ = *es la matriz de transición*

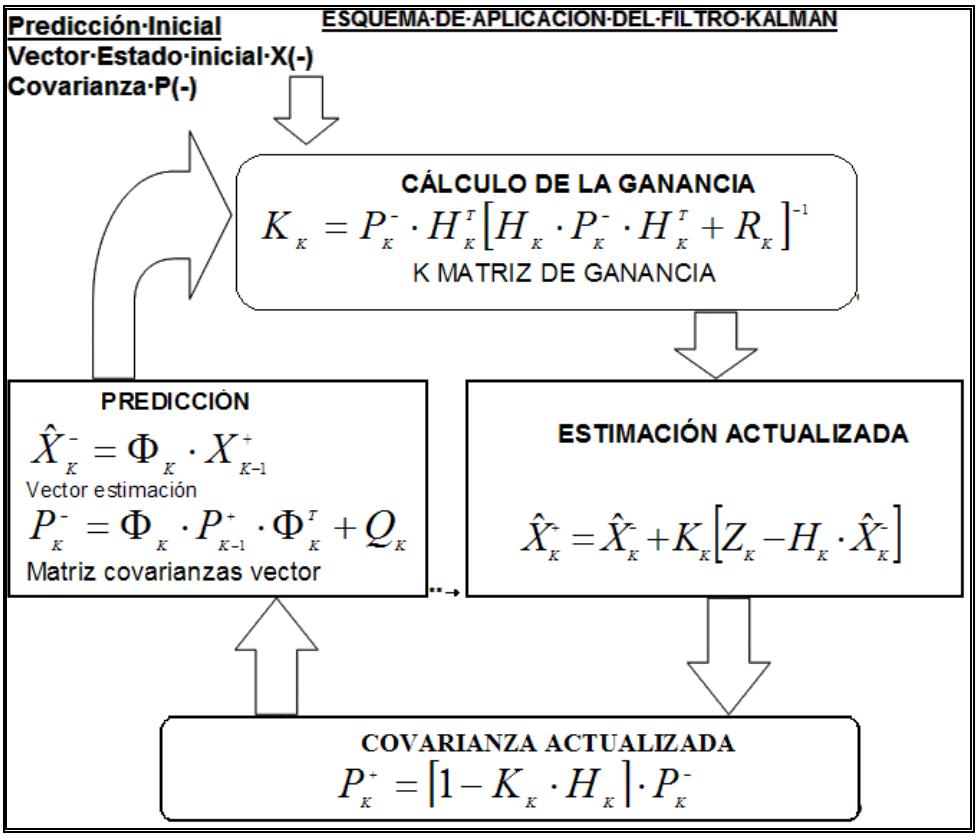


Figura 7.

Para un corto periodo de tiempo F puede considerarse como constante y se cumple

$$\Phi = I + F(t - t_0)$$

El filtro Kalman consiste en una predicción y actualización. Para el tiempo k al k+1 las ecuaciones de predicción son

$$X_{k+1}^- = \Phi_k X_k^+$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_k^T P_k^+ \Phi_k + Q_k$$

El signo (+) representa un valor actualizado, el signo (-) un valor extrapolado o predicho.

En nuestro caso plantearíamos la ecuación de observaciones del movimiento

$$\dot{X}_k = F_k \cdot X_k + V_k$$

- Siendo la Matriz de diseño o transición de estados resultado de la linealización de las ecuaciones diferenciales cinemáticas: F_K

- Vector de Observaciones INS/GPS: X_K

- Matriz de Ruido del sistema: V_K

La matriz de transición de estados viene definida por 3 parámetros de posición, 3 de velocidad, 3 parámetros de las orientaciones, 3 correspondientes a los errores sistemáticos de los giróscopos y 3 parámetros correspondientes a los errores sistemáticos de los acelerómetros. La matriz de del ruido del sistema es una matriz de varianzas-covarianzas obtenida de la estimación de la orientación externa en cada instante.

Inicializado el filtro Kalman con los datos de la orientación externa obteniendo unos valores de la posición estos se comparan con la información GPS, de esta forma se van corrigiendo los datos de posición y orientación obteniéndose una predicción y actualización para cada aposición del sistema integrado GPS/INS.

32.5. Ventajas y desventajas de la integración GPS/INS

32.5.1. Ventajas

Las ventajas de la integración del GPS con el sistema inercial son diversas e importantes ya que ambos sistemas tienen defectos si se usan independientemente pero se pueden disminuir al integrarlos. La unidad de medidas inerciales es un sistema autónomo que registra con una frecuencia de 200 Hz los ángulos y velocidades, lo que proporciona posiciones de gran exactitud en cortos periodos de tiempo. Sin embargo también presentan desviaciones sustanciales a lo largo del tiempo. Por lo tanto, con las medidas inerciales no se pueden determinar unas posiciones precisas.

Por otro lado, las observaciones DGPS son más estables y uniformes en el tiempo, aunque se registren a frecuencias en este tipo de levantamiento entre 0.1 y 1 Hz. En el DGPS los saltos de ciclos son los que producen mayores errores.

La integración de las observaciones de ambos sistemas permite que la información GPS modele la deriva posible de los datos de la unidad inercial, y a su vez las medidas inerciales detectan y corrigen los posibles saltos de ciclos del registro GPS. Normalmente se aplica un filtro Kalman para predecir, filtrar y suavizar los parámetros incógnitas de la trayectoria. De esta forma se integran los datos DGPS e IMU en un proceso conjunto para determinar la solución de la posición y orientación de la cámara aérea ó sensor. Como consecuencia, en el sistema inercial la precisión

de la posición va disminuyendo con el tiempo a causa de los errores de las componentes del sistema que no pueden ser eliminados del equipo. Debido a ello, necesita ser calibrado de forma continua por un medio externo para poder operar correctamente. Además, los componentes del mecanismo que conforman el INS pueden tener fallos que requieren una elevada redundancia para ser detectados.

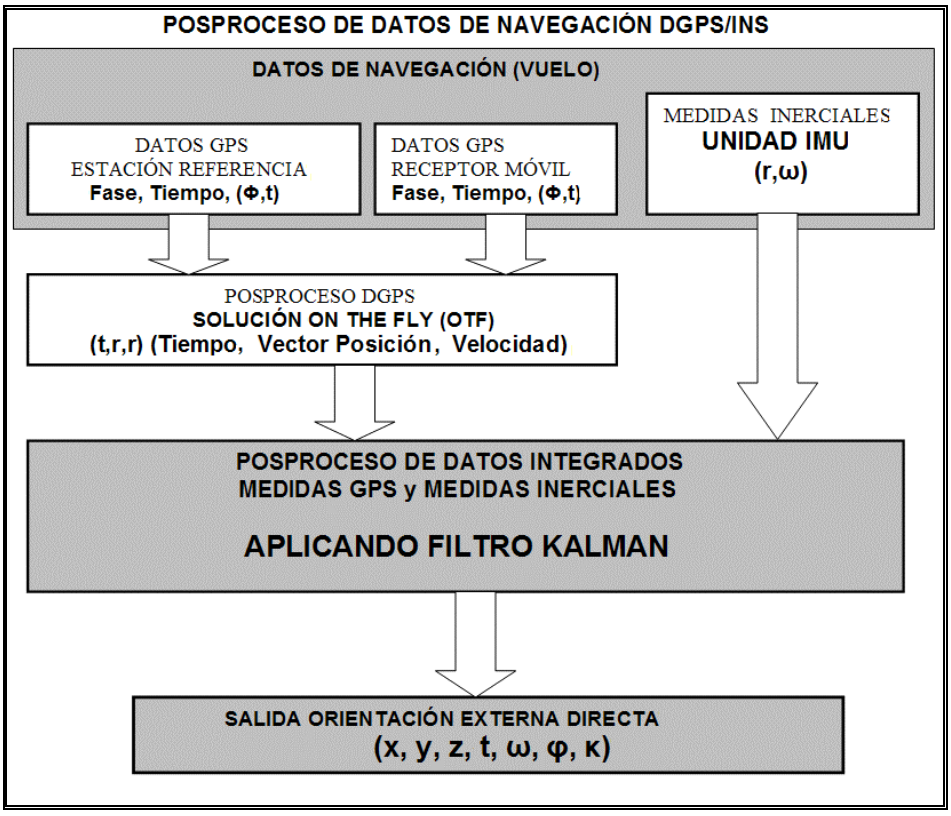


Figura 8. Postproceso de datos de navegación DGPS/INS

Por otro lado el GPS es vulnerable a la perdida de señal debido a diversas causas que ya se han descrito, además no es un sistema autónomo depende del sistema espacial y del sistema de control o seguimiento. La clave del sistema integrado es conseguir la unión de un sistema con muy buena precisión a corto plazo y mala estabilidad a largo plazo (INS) y un sistema con una precisión menor pero con alta estabilidad a largo plazo (GPS).

Como consecuencia las ventajas de la integración pueden resumirse en las siguientes

- Posiciones y velocidades de gran exactitud
- Calibración del Sistema Inercial
- Mejora de la adquisición y readquisición de observaciones GPS
- Integridad del sistema

- Mejora de la resistencia frente a las interferencias
- Mejor seguimiento de los satélites
- Uso del GPS durante periodos de pobre cobertura de satélites
- Limitación de la desviación a largo plazo

Con todo se hace indispensable la calibración del sistema integrado en su aplicación a proyectos fotogramétricos. Previamente al vuelo, para que sea totalmente efectivo el método de levantamiento o referenciación directa de imágenes aéreas. La calibración del sistema completo cobra una importancia capital, así como la sincronización de los sensores, su alineación, incluso su colocación, además de la problemática propia del levantamiento cinemático. Por tanto, el modo de trabajo y la metodología del proceso de datos deben de ser extremadamente fiables. La calidad del levantamiento aéreo directo depende de la calidad de los datos de control, de los sensores de navegación y la calidad de los propios sensores cartográficos. El sistema integrado de orientación directa exige que todos sus componentes trabajen acoplados y sincronizados (equipo inercial, GPS y cámara aérea).

Con la solución de la orientación directa se puede plantear prescindir de la utilización de puntos de apoyo terreno, incluso la aerotriangulación en el proceso de orientación de imágenes, puesto que proporciona los parámetros de orientación externa con suficiente precisión para aplicaciones en escalas medias y pequeñas. En la figura adjunta se presenta un diagrama con el flujo de información en una referenciación de imágenes totalmente directa en el cual es fundamental un vuelo de calibración de la cámara.

Los levantamientos fotogramétricos en zonas inaccesibles y levantamientos especiales pueden realizarse con gran precisión, y permite incorporar este método de orientación de fotogramas en los procesos de producción en fotogrametría.

32.5.2. Desventajas de la orientación directa de fotogramas

Hemos planteado hasta aquí las ventajas que la integración de los sensores GPS e IMU tienen en la determinación de la orientación de sensores y su posterior potencialidad en su aplicación en proyectos fotogramétricos como puede ser la eliminación completa de los puntos de apoyo. Con todo hay que considerar desventajas teniendo en cuenta la forma de operar de la fotogrametría en el cual la precisión, exactitud y fiabilidad son elementos fundamentales. En el modelo de ajuste combinado con datos GPS es posible controlar los sistematismos y los errores groseros que se producen en el levantamiento aéreo durante el proceso de Aerotriangulación. Sin embargo en la orientación directa los parámetros obtenidos no tienen redundancia por lo que desaparece la posibilidad de evaluar la fiabilidad de los parámetros de orientación y de los puntos del terreno. Desaparece la posibilidad de aplicar las técnicas de Autocalibración en el ajuste del bloque y de

esta forma poder corregir sistematismos en los fotogramas, o evaluar la calibración de la cámara métrica para refinar la información de su orientación interna.

La dificultad de integrar la información directa obtenida con los datos fotogramétricos debido a la influencia del sistema de representación cartográfico oficial utilizado como es la proyección UTM, ya que define un sistema plano-altimétrico que produce diferencias de escala en las observaciones planimétricas y altimétricas, además de diferencias de escala a lo largo del plano bidimensional XY en proyectos de gran extensión. A la influencia de la proyección cartográfica también hay que añadir la influencia de la curvatura de la Tierra. En esta situación se recomienda tener en cuenta estas diferencias cuado se integra la información directa en el proyecto. Y esta recomendación se traduce en aplicar dos técnicas alternativas de trabajo orientadas a la realización de Aerotriangulación con datos GPS/IMU con el fin de modelar estas diferencias. Por un lado realizar un ajuste combinado con puntos de apoyo y la introducción de parámetros de deriva que modelen estas discrepancias o simplemente realizar un ajuste sin apoyo de campo lo que se conoce como Orientación de Sensores Integrada (ISO-*Integrated Sensor Orientation*), con la ventaja de no necesitar calibración extra y la posibilidad de aplicación a proyectos de gran precisión de cualquier escala.

Orientación de sensores integrada con datos DGPS/INS

El método de Orientación de Sensores Integrada es una extensión de la Aerotriangulación con datos GPS/IMU en el ajuste de un bloque fotogramétrico es tan simple como el ajuste combinado con datos DGPS. Los nuevos datos auxiliares angulares se integran en el modelo matemático de haces como ecuaciones adicionales que se integran con los datos del bloque fotogramétrico mediante incógnitas comunes. A continuación se plantean los cuatro tipos de Ecuaciones de Observaciones Indirectas en el programa de ajuste combinado con datos DGPS/INS, medidas imagen, control terreno, coordenadas GPS del centro de proyección y datos auxiliares angulares como ecuaciones adicionales que se integran en el modelo matemático de haces, con pesos convenientemente asignados, que permiten el ajuste combinado de bloque de aerotriangulación. Ecuaciones de observación imagen, ecuación de colinealidad

$$x = x_0 + \Delta x \; - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_0 + \Delta y - f\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$[\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z}]$ = *coordenadas terreno*

$[\mathrm{X}_0, \mathrm{Y}_0, \mathrm{Z}_0]$ = *coordenadas de los centros de proyección*

= *matriz de rotación espacial, entre sistema imagen y sistema local*

$[x, y]$ = *coordenadas imagen*

$[\Delta x, \Delta y]$ = *modelo de distorsión de lentes y sistematismos*

r_{ik} = *son los coeficientes de la matriz de rotación espacial R*

f = *focal calibrada de la cámara métrica*

Ecuaciones de observación control terreno

$$\mathrm{X}_{\mathrm{PCTi}} - \mathrm{X}_{\mathrm{i}} = \upsilon_x$$

$$\mathrm{Y}_{\mathrm{PCTi}} - \mathrm{Y}_{\mathrm{i}} = \upsilon_{\mathrm{y}}$$

$$\mathrm{Z}_{\mathrm{PCTi}} - \mathrm{Z}_{\mathrm{i}} = \upsilon_{\mathrm{z}}$$

$[\mathrm{X}_{PCTi}, \mathrm{Y}_{PCTi}, \mathrm{Z}_{PCTi}]$ = *Control terreno del punto i*

Ecuaciones de observación de los centros de proyección obtenidos con GPS

$$\upsilon_{\mathrm{xCP}} = \mathrm{X}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{GPS}} - \mathrm{X}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{AT}} + (\mathrm{a}_{\mathrm{x}} + \mathrm{b}_{\mathrm{x}}\mathrm{t}_{\mathrm{GPS}});$$
$$\upsilon_{\mathrm{yCP}} = \mathrm{Y}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{GPS}} - \mathrm{Y}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{AT}} + (\mathrm{a}_{\mathrm{y}} + \mathrm{b}_{\mathrm{y}}\mathrm{t}_{\mathrm{GPS}});$$
$$\upsilon_{\mathrm{zCP}} = \mathrm{Z}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{GPS}} - \mathrm{Z}_{\mathrm{CP}}^{\mathrm{AT}} + (\mathrm{a}_{\mathrm{z}} + \mathrm{b}_{\mathrm{z}}\mathrm{t}_{\mathrm{GPS}});$$

$[\mathrm{X}_{CP}^{GPS}, \mathrm{Y}_{CP}^{GPS}, \mathrm{Z}_{CP}^{GPS}]$ = *Observaciones GPS de los centros de proyección del punto i*

$[a_X, a_Y, a_Z]$ = *parámetros incógnitas de traslación de la pasada s*

$[b_X, b_Y, b_Z]$ = *parámetros de inclinación de la pasada s*

t_i = *Tiempo GPS de observación del Centro de Proyección i*

Ecuaciones de observación de los ángulos obtenidos con INS

$$\upsilon_{\omega CP} = \omega_{CP}^{INS} - \omega_{CP}^{AT} + (a_{\omega} + b_{\omega} t_{GPS});$$
$$\upsilon_{\varphi CP} = \varphi_{CP}^{INS} - \varphi_{CP}^{AT} + (a_{\varphi} + b_{\varphi} t_{GPS});$$
$$\upsilon_{\kappa CP} = \kappa_{CP}^{INS} - \kappa_{CP}^{AT} + (a_{\kappa} + b_{\kappa} t_{GPS});$$

$[\omega_{CP}^{INS}, \varphi_{CP}^{INS}, \kappa_{CP}^{INS}]$ = *Observaciones angulares INS del punto i*

$[a_{\omega}, a_{\varphi}, a_{\kappa}]$ = *Parámetros incógnitas de traslación de las medidas angulares pasada s*

$[b_{\omega}, b_{\varphi}, b_{\kappa}]$ = *Parámetros incógnitas de inclinación de las medidas angulares pasada s*

t_i = *Tiempo GPS de observación del Centro de Proyección i*

En la figura 9 se muestra el flujo de trabajo en el ajuste combinado de sensores

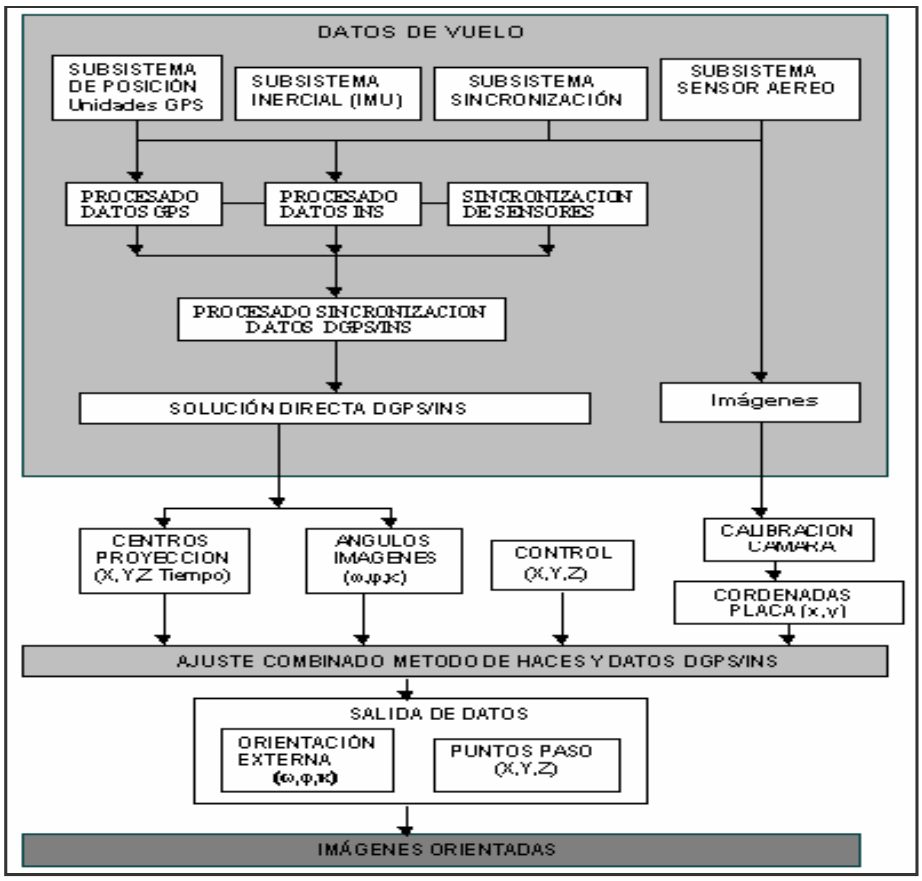


Figura 9. Flujo de trabajo en el ajuste combinado de sensores

La interpretación geométrica de los parámetros de deriva supone considerar tanto "a" como "b" parámetros de una línea recta igual que se describen en un ajuste combinado GPS. Esta integración de medidas directas DGPS/INS permite modelar los posibles errores sistemáticos que se hayan producido en el levantamiento aéreo, con la misma interpretación geométrica que

los parámetros de deriva introducidos para moldear las coordenadas de los centros de proyección en una aerotriangulación con datos auxiliares DGPS. Supone una alternativa y una extensión a la ya consolidada técnica de Aerotriangulación con datos GPS cinemáticos. En cualquier levantamiento extenso supondrá en principio una nueva reducción del número de puntos de control terreno a levantar. La Orientación de Sensores Integrada de un bloque con información adicional DGPS/INS permite un tratamiento eficaz de los errores sistemáticos propios de la imagen y del sistema sensor integrado (limitaciones del levantamiento DGPS, sincronización de sensores, acoplamiento de la unidad inercial y la cámara…), y el aumento de la fiabilidad y consistencia geométrica del bloque. Debemos señalar que el proceso de aerotriangulación digital automática también se beneficia de una mejora sustancial de rendimiento, al tratar bloques de fotogramas casi orientados, trabajando sobre bloques mejor georreferenciados previamente a la tarea de correlación automática.

Bibliografia

[1] Cramer, M. (1999). *Direct Geocoding - is Aerial Triangulation obsolete?* 47th Photogrammetric Week'99. Eds. Fritsch/Spiller, Wichmann Verlag, Karlsruhe. Germany.

[2] Ackermann, F. (1987): The use of camera orientation data in photogrammetry-A review*. Photogrammetria, 42.

[3] Ackermann, F., 1984. Utilization of navegation data for aerial triangulation. Int.Arch.Photogramm. remote Sensing., Vol.25-A3a, Río de Janeiro-Brazil, pp. 1-9.

[4] Heipke, C. Jacobsen, H. Wegmenn, H. Andersen, O. Nilsen, B. (2000) Integrated sensor orientation – An OEEPE test. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol XXXIII, Part B3. Amsterdam.

[5] Jekeli Christopher. 2001. Inertial Navigation System with Geodetic Applications. Berlin; NewYork De Gruyter

[6] Kraus, K. 1993. *Photogrammetry* Vol. 1. Dummlers Verlag. Bonn.

[7] Kraus, K. 1997. Photogrammetry Vol. 2. Dummlers Verlag. Bonn.

[8] Mikhail, E,M. Bethel J,S. McGlone J, Ch. (2001) Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley and Sons, Inc.

[9] Leick Alfred (1995) GPS Satellite Surveying, second edition. John Wiley and Sons, Inc.

[10] Papí, F y otros, (2003). Curso de Referenciación de Imágenes Aéreas. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento Madrid

[11] Ressl, C. The impact of conformal map projections on direct georeferencing

[12] Skaloud Jan. (1999) Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment. Workshop. Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation, Barcelona, 1999.

[13] Wolf, 2000. Elements of Photogrammetry with applications in GIS. McGraw – Hill.

Tema 33. Características de la imagen digital: Geometría y radiometría de la imagen digital. Relación entre imagen analógica y digital. Técnicas imagen híbridas (digitización, tamaño de píxel, sistema de coordenadas). Entropía, codificación y compresión de imágenes. Formatos imagen, JPEG estándar de compresión de imágenes raster en estaciones digitales. Formatos digitales utilizados en fotogrametría digital.

33.1. Características de la imagen digital

Un ordenador digital procesa la información que recibe en forma de unidades numéricas discretas o dígitos. Las imágenes que utilizamos normalmente en fotogrametría no suelen venir expresadas en tales unidades. La fotogrametría desde sus comienzos ha venido utilizando las emulsiones fotográficas sobre película o bases de vidrio de gran estabilidad dimensional. Un fotograma ordinario es la representación analógica de una escena, de forma que la información que contiene aparece registrada en gradaciones continuas de tonos grises (luminancias) a escala macroscópica, y en algunos casos de color, a lo largo de la superficie de la película bidimensional.

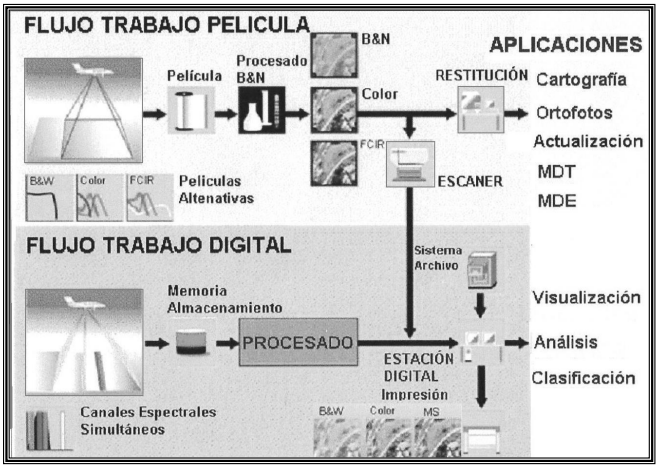


Figura 1. Flujos de trabajo

Por tanto, previamente al procesamiento de un fotograma por medio de un ordenador, es necesario que la imagen analógica continua (medios tonos) se convierta en formato digital con el empleo de convertidores, aplicando las operaciones de discretización, cuantificación y codificación cuando trabajamos en *softcopy*, o bien que la captura de la imagen se realice con una cámara digital o cualquier otro sensor utilizado en teledetección directamente. Todo ello define dos flujos de trabajo cuando trabajamos con imágenes digitales tal como se muestra en la figura 1.

Modelo matemático de una imagen digital

Una imagen digital puede representarse como una función continua de valores de gris (variable dependiente, nivel de gris, densidad, intensidad) con dos variables espaciales independientes. Al no poder describir la imagen como una función analítica se utilizan funciones discretas, por ser la imagen digital el registro de intensidades (energía) positiva y finita, y el tamaño de la imagen limitado. El modelo de datos de pixels es el adecuado en el entorno de trabajo de la fotogrametría, en este modelo una imagen se representa como una colección de elementos discretos o pixels (mayormente en el rango de 0 a 255) representando un nivel de gris (este valor también puede ser un índice en la tabla de color), alternativamente los pixels pueden contener tres valores representando niveles de rojo, verde, azul y actualmente una banda en el infrarrojo cercano.

- Modelo de datos de pixels

Una imagen digital "Imagen digitizada" consiste en una matriz bidimensional G(I,J) con elementos g_{ij}. Cada elemento se denomina pixel (picture x element). El índice i varía desde 1 hasta I en intervalos de pasos enteros o unidad, i = 1,....,I, índice para las filas; el correspondiente índice para las columnas es j = 1,....,J.

Cada elemento de la matriz viene representado por un área, hablaremos entonces de elementos imagen o pixels mejor que de puntos imagen. La dimensión de cada pixel es de Δx e Δy. La calidad de una imagen digital dependerá de la finura de este retículo, si el tamaño de pixel es demasiado ancho se pierde información y con pixels demasiado pequeños entran en juego otros factores como la aparición de ruido imagen y pérdida de calidad, además de ser necesaria gran cantidad de memoria de almacenamiento.

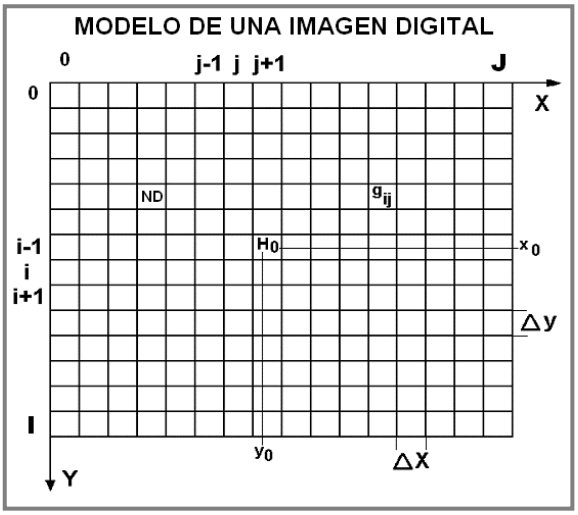


Figura 2. Modelo de una imagen digital

La **codificación** de los datos de pixels de la imagen se realiza en formato binario de forma que los pixels g_{ij} son los portadores de información o señal según un número de bits por pixel que describe la radiometría de la imagen. El valor del pixel (luminosidad de la señal) o tonos de grises dependen del tipo de instrumento de registro y del ordenador usado. El rango de valores varía desde 0 a 255 niveles de grises, que excede ampliamente las capacidades de apreciación del ojo humano (aproximadamente de 24 tonos o 65 niveles de gris). La información conteniendo los 256 diferentes valores pueden ser almacenados en registros (palabras) de 8 bits o byte (2^8 bit combinaciones), esta codificación de 2^8 será suficiente para todas las aplicaciones de fotogrametría digital y es un índice importante de cada cámara digital que se conoce como profundidad de pixel (bits/pixel). La profundidad de pixel determina la capacidad de la cámara o el sensor imagen para separar determinados niveles de grises o tonos. A la codificación anterior hay que añadir la estructura interna de los datos que vendrá determinada por su organización secuencial o jerárquica, y por su orden de grabación, número de pixels por cada plano, banda o color.

Desde los comienzos de la fotogrametría digital la obtención de una imagen digital se ha venido realizando con un escáner (barredor plano principalmente o de tambor etc.), actualmente se realiza, principalmente, mediante la captura con una cámara digital directamente. En la conversión de la imagen analógica al formato digital (en una matriz de niveles de grises) el proceso de codificación se llama cuantificación (discretización de los niveles de gris), y el proceso de formación de los pixels de la imagen denominado reticulación, y se obtiene durante el barrido de la función unidimensional original de la imagen continua f(x) en cuanto a ubicación e intensidad, todas estas operaciones, en este caso, se realizan con un escaner fotogramétrico.

33.1.1. Geometría de la imagen digital

La imagen digital es por tanto una matriz de pixels y se describe en términos de su geometría y radiometría, principalmente, además de sus características espectrales y temporales.

Resolución espacial y tamaño de píxel

El tamaño de un objeto registrado en un simple elemento CCD depende de las propiedades ópticas del sensor y del tamaño de dicho sensor. Cada pixel de una imagen es el resultado del muestreo de luz incidente continua. Los pixels como hemos visto se distribuyen en un patrón regular según una malla cuadrada o rectangular y queda definido por su tamaño de pixel. También se puede especificar por el IFOV (campo de vista instantáneo) que es el tamaño resultante de la resolución del detector a escala del terreno, o el ángulo determinado por el tamaño del pixel en el plano focal. Un IFOV alto implica que cubre una escena mayor, y supone por tanto una resolución espacial menor. Por otro lado el EIFOV que es el IFOV efectivo basado en el sistema MTF**.**

Cuando tratamos una imagen analógica la resolución espacial viene expresada por el número de pares de líneas (lp/mm) que pueden distinguirse en un patrón de test formado por líneas dobles blancas y negras de distinto tamaño y frecuencia, entonces el tamaño del pixel no es una medida de la resolución pero podemos establecer una relación o equivalencia entre ambos índices.

La resolución imagen se determina teniendo en cuenta la geometría del sensor y por factores externos al sensor como son las condiciones atmosféricas, movimiento el tipo de plataforma etc. Cuando adecuamos la frecuencia de los pixels de los CCD lo podemos expresar por la expresión de la frecuencia de muestreo K_s, siendo Δx la distancia entre los centros de los pixels en micrómetros (μm):

$$K_s = \frac{1000}{\Delta x} \ (pixels/mm)$$

Un par de líneas pueden distinguirse con un tamaño de pixel igual a la mitad del par de líneas cuando el pixel está perfectamente alineado con el patrón de rayas, sin embargo para distinguir pares de líneas en otras situaciones en las que el tamaño del pixel no está perfectamente coincidente con el patrón de rayas, entonces se establece la relación entre el número de pares de líneas y el pixel que según el factor de Kell debe ser del orden de 1:2 a 1:3

$$\text{Resolución (lp/m)} = \text{Tamaño Pixel} \times 2\sqrt{2} \text{ m} \quad \text{a la escala objeto}$$

GSD ***(Ground Sample Distance)*** es igualmente un índice importante en la descripción de un sistema imagen y se corresponde con el tamaño del pixel proyectado sobre el terreno, se obtiene multiplicando el tamaño del pixel por la escala de la imagen

$$GSD = m_m \cdot \Delta x$$

Donde Δx es el tamaño del pixel imagen y m_m la escala de vuelo.

También se denomina distancia resuelta en el terreno y ha sido utilizada para indicar la resolución de los sistemas satélite durante años, ante las dificultades de expresar la resolución óptica de los sistemas imagen, entonces el GSD sirve para sensores imagen CCD donde el producto de la escala de vuelo y el tamaño del pixel proporcionan un razonable grado de exactitud. A modo de resumen estableceremos que el término GSD expresa el espacio terreno ocupado por un pixel.

33.1.2. Radiometría de la imagen digital

Cada píxel de una imagen representa un valor de intensidad, es el resultado de un proceso de cuantificación del valor de valores analógicos continuos o de la captura directa con cámaras aéreas digitales. Para describir la cantidad medida sobre una imagen digital se utilizan las siguientes magnitudes:

- **Intensidad:** brillo de la imagen expresado en voltios o lúmenes
- **Valor de Gris:** valor registrado en una escala de grises, los niveles de grises son 256, también se denomina **Número Digital (ND)**
- **Densidad:** expresa el grado de opacidad de una película que es registrado como un valor de gris

Un píxel puede tener múltiples valores asociados, como en el caso RGB con tres valores asociados. Incluso tener cuatro o más bandas dando lugar a las imágenes multiespectrales. La representación matricial tendría la forma

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g(0,0) & g(0,1) & . & . & g(0,j-1) \\ g(1,0) & . & . & . & g(1,j-1) \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ g(i-1,0) & g(i-1,0) & . & . & g(i-1,j-1) \end{pmatrix}$$

Filas x = 0, 1, …..., i-1
Columnas y = 0, 1, ……, j-1
I = número máximo de filas
J = número máximo de columnas

Siendo g(x,y) = {0, 1,……., máx} un Nivel de Gris, o ND = g(energía radiante recibida), este Número Digital es consecuencia de la energía radiante determinada por el factor de iluminación y el de reflectancia del objeto de acuerdo con el modelo de la Teledetección.

La matriz que representa una imagen digital puede ser también tridimensional. Entonces un tercer índice k sería el número de canal o banda. Lo que nos lleva a definir varias clases de imágenes digitales.

- imagen blanco-negro, de tonos de grises (pancromático, monocromático, intensidades térmicas etc.), banda k = 1.
- imagen en color con canales rojo-verde-azul, imagen en falso color (infrarrojo), k = 3
- imágenes espectrales múltiples (con más de tres seudocolores), k > 3.

Una imagen con tres canales se puede representar como: $G_c = \{g_1(x,y), g_2(x,y), g_3(x,y)\}$

Podemos trabajar con imágenes multicanal que representamos como $g_i(x,y)$ con i = 0, 1,…., n-1, y de forma similar una secuencia de imágenes la representamos como $g_t(x,y,t)$ con la variable temporal t = 0, 1,…..,T; estas imágenes de video son importantes en las aplicaciones de fotogrametría móvil.

En fotogrametría digital se está trabajando actualmente con imágenes con un canal pancromático y tres bandas RGB incluso con cuatro bandas RGB e Infrarrojo cercano. Para imágenes en blanco y negro, los valores de pixel representan niveles de grises o densidades (negro con valor 0 y blanco con valor 255). Para imágenes en color tenemos tres matrices imagen con los mismos rangos, normalmente nos referimos a un bloque con tres bandas. Imágenes en color y normalmente imágenes multiespectrales con más de tres rangos espectrales juegan un importante papel en los sensores remotos.

Rango dinámico del sistema imagen

En el proceso de cuantificación la señal de ENTRADA da lugar a otra de SALIDA que define el rango dinámico de la imagen. Si representamos estas señales obtenemos la curva del sensor donde observamos las zonas en las cuales el sensor imagen es sensible, se aprecia una zona no saturada y otra zona en la parte superior saturada, la parte central de la curva representa el rango dinámico del sensor que es casi lineal.

El rango dinámico **(RD),** de un pixel en un sistema imagen, viene dado por el término de la razón señal/ruido que se define por la razón de la máxima señal de salida, o nivel de saturación, al error medio cuadrático del nivel de ruido negro (velo en una película). El rango dinámico viene determinado, al igual que la sensibilidad, por la capacidad de carga que tiene un pixel del sensor que a su vez está determinada por el tamaño del pixel.

$$RD = 20 \times \log\left(\frac{V_{sat}}{V_{Ruido(rms)}}\right)$$ Expresado en decibelios (dB)

Ruido imagen

En general todos los sistemas óptico-electrónicos, al igual que cualquier otro sistema no ideal, presentan como característica la adición o superposición de ruido a la imagen captada o procesada. El ruido, básicamente, puede clasificarse en dos grupos principales atendiendo a su distribución estadística

- Ruido Local determinístico o "patrón". Es característico de cada sistema en particular, y presenta siempre la misma forma o apariencia. En un sistema de captura de imágenes puede observarse como una franja siempre más oscura, una banda de interferencias, o cualquier otra distribución constante y determinada. Conociendo el patrón de ruido es fácilmente filtrable.

- Ruido aleatorio "ruido blanco" obedece a fuentes totalmente imprevistas e indeseables, que intervengan en el proceso de barrido o procesado. Su distribución estadística es aleatoria y cambia con el tiempo.

- Fuentes del ruido imagen

El ruido imagen podemos decir que es causado por dos factores principales

- **Factores radiométricos:** como son las diferencias de iluminación del objeto en distintas tomas, diferencias en el procesamiento de la película e influencia del proceso de digitización y degradación debida a la atmósfera (en el caso de fotografía aérea)

- **Factores geométricos**; diferencias en las perspectivas de la tomas fotográfica, y desplazamientos debidos al relieve entre otros. Estos factores producen diferencias de escala entre imágenes, diferente rotación entre imágenes, deformaciones debido a la distinta inclinación de los fotogramas que se transmite como distorsión geométrica. El

efecto del relieve se transforma en una distorsión geométrica desde el nadir, y el efecto de la inclinación de la imagen produce cambio de escala desde el isocentro. Estas distorsiones juegan un papel determinante en los distintos métodos de correlación entre imágenes.

A estos factores hay que añadir un tercer factor, debido a las características propias de la captura imagen y producido por el sistema sensor CCD, que se expresa como la razón señal / ruido de la señal en escala logarítmica

$$S/\mathrm{N} = 10\log\left(\frac{\text{Amplitud Señal}}{\text{Amplitud Ruido}}\right)$$

Fuentes de Ruido debido al equipo de digitización son:

- Proceso de cuantificación
- Nivel inferior de saturación
- Proceso Electrónico

33.2. Relación entre una imagen analógica y digital

Para obtener imágenes digitales, sobre las que realizar las operaciones *softcopy*, es necesario el proceso previo de escaneado o digitización en el flujo de trabajo de la fotogrametría digital, por el cual una película analógica es convertida en un formato compatible que pueda leer y procesar un ordenador. Esta conversión se ha venido realizando habitualmente con un escáner. Una imagen o película fotográfica cotidiana presenta amplios contrastes y alta resolución sin embargo en el caso de los fotogramas aéreos estos presentan bajo contraste y casi toda la información está comprendida entre las densidades 0.3 y 1.0 D. Normalmente encontramos dificultades cuando tratamos de convertir estas altas calidades de imagen al formato digital, en esta conversión juega un papel fundamental tener en cuenta la calidad (geométrica, radiométrica) y resolución del escáner utilizado.

Teorema de la exploración o barrido (*sampling*)

Independientemente de la forma de obtener una imagen digital el factor más importante del proceso de muestreo es el del tamaño del pixel o intervalo de escaneado en el caso de trabajar con un escáner y píxel terreno en el caso de realizar la captura con una cámara digital. El intervalo óptimo se deduce aplicando la transformada de Fourier que transforma una señal del dominio espacial al dominio de la frecuencia. Establece que no se pierde información en el proceso de escaneado si la frecuencia de escaneado es la mitad de la máxima frecuencia que encontramos en la imagen a transformar. También podemos expresarlo de acuerdo con la teoría de *sampling* que dice que solo aquellas estructuras objeto que sean al menos dos veces más grandes que el intervalo de exploración

(*sampling*) pueden reconstruirse sin ambigüedad de las imágenes, esto se expresa por las siguientes relaciones.

$$\Delta x \leq \frac{1}{2 \cdot f_s} \text{ ; o bien } \Delta \mathrm{x} \leq \frac{1}{2\,\mathrm{K_s}}$$

Si no se cumple esta condición hay peligro de que las estructuras finas se interfieran, como resultado de la interferencia de la señal de la imagen con el intervalo de exploración.

33.3. Técnicas imagen híbridas: digitización

En los dispositivos de carga acoplada (CCD) la totalidad de la imagen llega directamente sobre un conjunto rectangular o lineal de sensores; cada sensor registra el brillo de su propia porción de imagen y lo trasmite directamente al ordenador. Una de las ventajas de los dispositivos de rastreo de imágenes por semiconductores, además de proporcionar una salida digital, es conseguir que la respuesta sea directamente proporcional a la intensidad de la luz incidente sobre el conjunto de sensores.

La respuesta lineal no es una característica de las imágenes registradas fotográficamente. En fotografía, como hemos visto, la densidad de los granos de plata de una película revelada es proporcional al logaritmo de la intensidad de la luz incidente sobre la placa. Como consecuencia el carácter logarítmico de esta respuesta debe tenerse en cuenta cuando se procesa digitalmente una imagen fotográfica. El proceso de observación de una imagen supone, primeramente, su división en celdillas discretas (pixels) discretización (reticulación) de la ubicación de los elementos imagen; el brillo de cada celda es una variable continua. Este brillo debe cuantificarse, es decir, debe convertirse en un valor numérico discreto. En esta etapa del proceso, el brillo de la muestra se divide en un cierto número de intervalos consecutivos conocidos como niveles de cuantización. Todos los valores de brillo de la muestra que se sitúan dentro de un intervalo dado se reemplazan por un valor asignado al correspondiente nivel de cuantificación.

El número total de niveles de cuantificación considerados en cada caso define una escala de grises, es decir el número de tonalidades que se pueden representar. Si la escala de grises sólo tiene dos niveles, las celdillas serán blancas o negras. Una escala de grises con 64 niveles permite obtener reproducciones bastante reales de un objeto. La asignación de los niveles correctos supone el análisis de la respuesta de los elementos sensor en función de unas densidades previamente tabuladas. A través de la Tabla de Consulta (LUT - *Look-up-table*) del escáner se estudia la respuesta lineal del sensor con una paleta de niveles de grises asociada, determinando la función de transferencia lineal, teniendo en cuenta también el rango dinámico y el ruido imagen.

En los procesos posteriores a la digitización, particularmente en procesos de producción de ortofotos digitales, se aplican también procedimientos de mejora de la imagen mediante técnicas de tratamiento de imágenes digitales. Por ejemplo cambios de contraste y brillo de fotogramas en blanco y negro. En esta operación se pretende cambiar el tono de gris g_{ij} de un pixel de la matriz original G a un valor g_{ij} de la matriz G mejorada.

La función más simple aplicada es una función lineal, denominada función de transferencia de contraste o intensidad, esta función toma la forma

$$\overline{g}_{ij} = c \cdot g_{ij} + d$$

siendo c el parámetro de control de contraste y d el parámetro de control de brillo. Según los valores de c y d tendremos distintos cambios del contraste de la imagen.

Se pueden aplicar otras soluciones, como pueden ser diferentes cambios de contraste a diferente rango de valores de los tonos de gris, o también aplicar funciones de transferencia no lineales. Tales cambios de contraste, como función de los tonos grises, deben adaptarse a la respuesta específica del ojo humano. En la digitización de imágenes fotográficas en un escáner obtenemos primero la transparencia τ de la película o su inversa la opacidad O. Si reproducimos la escala de grises según los intervalos de gris capturados como variación lineal de la opacidad, un observador humano no distinguirá estas diferencias de opacidad como variaciones lineales. El deseado efecto lineal solo será observado si los valores de tonos grises de los intervalos capturados varían como el logaritmo (en base 10) de la opacidad. Los tonos de gris, que se corresponden con la opacidad, deben ser modificados por una función de transferencia logarítmica. Esta función de transferencia logarítmica se incorpora también en el escáner, así que los niveles de gris obtenidos después de la digitización son en realidad las densidades D.

Los cambios de contraste y brillo dados por la función lineal o no lineal se resuelven normalmente con la denominada tabla de consulta. Por ello, primero se calcula el valor de tonos grises g_{ij} correspondiente a todos los valores g_{ij} de niveles de grises -normalmente entre 0 y 255- y se almacenan en una tabla, de forma que durante el procesamiento de la imagen solamente tomamos el valor g_{ij} correspondiente al valor original g_{ij}.

33.3.1. Tamaño de pixel de escaneo

Para conseguir las mismas exactitudes de la fotogrametría analítica en *softcopy* el tamaño del pixel de la digitización de fotogramas aéreos debe ser de pocas micras. Si la exactitud no es una

necesidad primaria, como trabajos de fotointerpretación etc, es suficiente un tamaño de pixel mayor. Para la producción de ortofotos digitales se pueden utilizar tamaños de pixels mayores.

33.3.2. Digitización de fotogramas (negativos-diapositivas)

Si la tarea a realizar necesita de elevada exactitud y procesos convencionales (no en tiempo real) la fotogrametría digital, todavía, comienza con la adquisición del fotograma normal seguido de procesos de digitización de la película.

La precisión, en la colimación de un punto aislado, correlaciones automáticas etc, de un sistema de imágenes digitales depende principalmente de la resolución y precisión de la imagen escaneada, determinado a su vez por el tamaño del pixel. Nos planteamos, seguidamente, determinar el intervalo de escaneado adecuado para adaptarse a la resolución del fotograma, sobre la base del poder de resolución de una película de resolución R = 27 lp/mm = 54 L/mm.

Basándonos en la teoría general de escaneado, tomamos como expresión práctica para determinar el poder de resolución fotogramétrica: R(mm) = 0,7/(2R) = 0,013 mm, en nuestro caso. Redondeando obtenemos el valor de 15 μm (micras) que asegura que no perdemos información del fotograma cuando lo digitizamos (K. Kraus Vol. 1).

R (mm) = 0.7 / (2R) * Teoría de escaneado
R = 27 lp/mm R = 0.0130 mm = 13 micras
R = 42 lp/mm R = 0.0080 mm = 8 micras
R = 100 lp/mm R = 0.0035 mm = 3.5 micras

El intervalo de escaneado no debe confundirse con el tamaño del elemento del sensor (CCD). En proceso ideales ambos intervalos son iguales. En algunos instrumentos de barrido el intervalo de digitización es muy pequeño y el elemento del sensor mayor. En este caso se producen solapamientos de pixels con ciertas manchas de la información del fotograma original.

Tamaños de pixel más pequeños que 7 μm puede no ser adecuado para el esfuerzo realizado. Cuando disminuimos el tamaño del pixel la relación señal ruido (SNR), medida de la calidad del sensor, toma valores igual a uno. Una razón señal ruido igual a uno significa que el ruido es tan relevante como la información imagen o señal. Por otro lado es esencial la elección de un buen escáner para realizar una conversión adecuada de la información de la imagen analógica.

Normalmente trabajando con escalas medias y fotogramas de aéreos digitizados de 23cm x 23cm la escala de la imagen original y el intervalo de escaneado son factores decisivos en la economía del proyecto fotogramétrico diseñado, así como factor decisivo en la calidad del producto final. Varios criterios pueden utilizarse para determinar el tamaño del pixel según las distintas aplicaciones cartográficas.

TAMAÑO DEL PIXEL SEGÚN CRITERIOS DE IMPRESIÓN

Si suponemos que la impresión litográfica proporciona una resolución de 300 líneas/pulgada = 11.8 L/mm = 6 lp/mm de forma que puede transferirse toda la información que sea capturada por el ojo humano cuando se observan impresiones de calidad. Con las planchas litográficas e impresoras de alta calidad es posible obtener tramas de medias tintas de hasta 118 líneas/cm, pueden reproducirse sobre materiales revestidos, aunque utilizar tramas de 50 a 70 líneas por centímetro es lo más corriente. Según esto, la relación entre la dimensión del pixel terreno (m/pixel RESOLUCIÓN TERRENO) y la escala del mapa está dada por:

Tamaño del pixel $R_T = 1/12 \times 1/1000 \times m_m = 8.47 \times 10^{-5} \times m_m$

** m_m escala de mapa

* 12 L/mm impresión litográfica

EJEMPLO: $8.47 \times 10^{-5} \times 4000 = 0.33$ m/pixel

$8.47 \times 10^{-5} \times 6000 = 0.50$ m/pixel

$8.47 \times 10^{-5} \times 25000 = 2.1$ m/píxel

Resumiendo un pixel de aproximadamente 2.1 metros de tamaño es la resolución terreno en metros/pixel que son necesarios para escala de mapa 1:25.000. Para una escala de mapa 1:50.000 la resolución terreno es de 4.2 m/pixel. También podemos deducir de $m_m = R_T \times 10^{-5} / 8.47$; y $m_m = 11.806 \times R_T$

TAMAÑO DE PIXEL EN GENERACIÓN DE ORTOFOTOS

El tamaño del pixel para la producción de ortofotos ha sido largamente debatido por la circunstancia de que el observador humano no ve más detalles que los proporcionados por 3 a 8 pixel por milímetro y como REGLA la ortofoto no debería presentar mayores escalas que entre 4 y 10 veces la escala del fotograma original. Para el caso particular de una imagen con resolución de R=50 lp/mm sería adecuado, para conseguir una buena observación visual, aplicar un aumento de

x4 sobre la imagen original. Si la imagen presenta una resolución de R=75 lp/mm el aumento recomendado sería de x6.

TAMAÑO DE PIXEL EN ESTEREO-FOTOGRAMETRIA

El error σ_{px} que podemos esperar en las medidas de paralajes cuando empleamos técnicas de correlación digital es

$$\sigma_{px} \leq k \cdot PR$$

Donde $0.2 < k < 1.5$ son valores normalmente aceptados y PR (Es tamaño de pixel o poder de resolución). K es un número adimensional y expresa el grado de autocorrelación alcanzado (ya sea visual o automático). Por ejemplo K = 0.4 es equivalente a un error de 0.4 de un pixel.

El error en paralaje-x se transfiere en un error de altitud (h) dado por la ecuación de paralaje cuando $p_y = 0$, σ_h expresa la precisión de una observación aislada, obteniendo

$$\sigma_h = H/f \cdot H/B \cdot \sigma_{px}$$

σ_{px} es el error total de paralaje en el plano imagen, H/f es la escala de la imagen y H/B la relación altura base. Expresada la fórmula de la paralaje en unidades terreno tenemos

$$H/f \cdot \sigma_{px} = \sigma_{pX} = k \cdot PR \quad \text{(en unidades terreno)}$$

Entonces

$$\sigma_h = H/B \cdot k \cdot PR$$

Despejando el tamaño del pixel

$$PR = 1/k \cdot B/H \cdot \sigma_h$$

Por ejemplo National Map Accuracy Standars de EE.UU considera el error estándar de la altitud como

$$\sigma_h = 0.3 \cdot CI \text{ (equidistancia de curvas de nivel)}$$

de modo que sustituyendo k = 0.36 obtenemos como expresión para el tamaño del pixel terreno:

$$PR = 1/0.36 \cdot B/H \cdot 0.3 \cdot CI$$

Para B/H = 0.6 y escala 1:25.000 (intervalo de curvas de nivel 5 metros) obtenemos

PR = 0.83 · 0.6 · 5 m
PR = 2.5 metros a escala 1:25.000 (CI=5m)
PR = 5.0 metros " 1:50.000 (CI=10m)

σ_p = 0.3 mm de la escala del mapa (error estándar en la posición de un punto)

RESUMEN PRECISIONES PLANIMÉTRICAS Y ALTIMÉTRICAS STEREOMÉTRICAS

$$\sigma_{H.} = k \circ (m_f \circ PR) \text{ en unidades terreno}$$
$$\sigma_Z = m_f \circ H/B \circ \sigma_{px} = k \circ (m_f \circ PR)$$

Donde la constante k viene influenciada por: tamaño pixel, contraste y textura imagen y la habilidad del operador.

33.3.3. Sistemas de coordenadas

Los sistemas de coordenadas utilizados en fotogrametría digital son

- Sistema de coordenadas placa o pixel de la imagen digital está explícitamente dado a través de la matriz de valores de grises en Filas y Columnas
- Sistema de coordenadas imagen, está solo implícitamente dado vía marcas fiduciales. Una transformación lineal nos determinará los parámetros de un sistema en otro identificando puntos idénticos y marcas fiduciales
- Sistema de coordenadas objeto o sistema de coordenadas terreno

Desarrollados los conceptos básicos de la conversión de una imagen analógica y continua en otra digital y discreta, planteamos a continuación los sistemas de coordenadas de trabajo en el entorno digital. Si utilizamos una imagen digital en aplicaciones de fotogrametría necesitamos establecer la relación entre la posición del pixel y el sistema de coordenadas imagen xy de calibración (orientación interna). La figura de la imagen digital muestra el sistema de coordenadas imagen con origen la posición media de un pixel dentro de la imagen y girada 100 grados respecto de la posición previamente adoptada como sistema de coordenadas imagen. Si multiplicamos el índice i por Δx tenemos las coordenadas imagen x del centro del pixel g_{ij}. Igualmente, multiplicando el índice j por Δy obtenemos las coordenada imagen y del pixel. Las tradicionales medidas de

coordenadas imagen son reemplazadas por la identificación y posición de los píxeles, esto permitirá una identificación mediante técnicas automáticas, la mayoría de las veces.

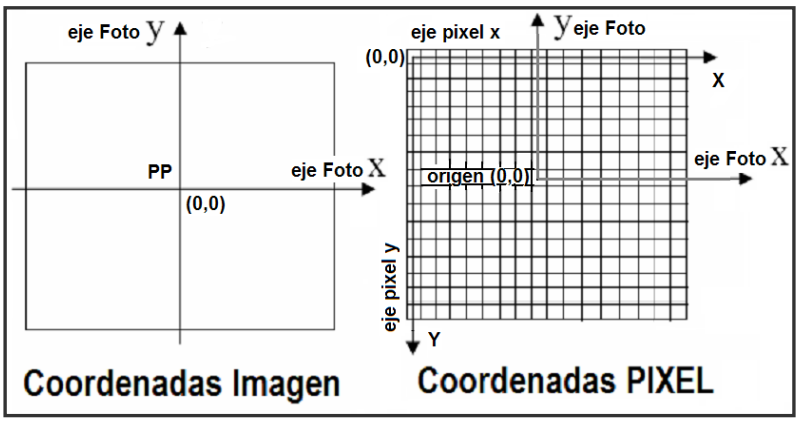


Figura 3. Sistemas de coordenadas

La restitución fotogramétrica también requiere el conocimiento de la orientación interna, la misma figura de la imagen digital muestra la posición del punto principal PP en el sistema de coordenadas xy. Si los pixel son lo suficientemente pequeños, basta conocer que pixel contiene el punto principal.

33.4. Entropía, codificación y compresión de imágenes

La capacidad de almacenamiento y las técnicas de compresión de datos son componentes fundamentales y necesarias de un sistema de fotogrametría digital. La tecnología de almacenamiento está desarrollándose rápidamente, según un crecimiento exponencial, lo que posibilita un nuevo enfoque de los desarrollos *Softcopy*. En estas circunstancias, tres son las razones para el desarrollo y conocimiento de las técnicas de compresión y cuyo objetivo es la reducción del número de bits con vistas a tratar la imagen en condiciones óptimas para la explotación en fotogrametría.

1) **primero,** el acceso a los datos y la transferencia dependen proporcionalmente del tamaño de los datos
2) **segundo**, el proceso de datos, algoritmos de correlación, visualización y presentación a través de Internet etc. en tiempo depende de este tamaño
3) **tercero** el almacenamiento del trabajo realizado y la creación de una base de datos digital dependen igualmente del tamaño

El desarrollo de *softcopy photogrammetry* y el desarrollo de estaciones de fotogrametría digital han producido una gran demanda de imágenes aéreas digitales, satélite, terrestres etc. Estas imágenes pueden registrarse directamente usando cámaras de estado sólido y sensores satélite o indirectamente escaseando fotogramas existentes. A pesar de las ventajas de las imágenes digitales sobre las películas, el problema del almacenamiento requiere una especial atención.

Intervalo de escaneado	Fotograma **Blanco y Negro**	Fotograma **color**
5 μm = 0.005 mm	2018 Mbytes≈ 2 **Gigas**	6054 Mbytes≈ 6 **Gigas**
10 μm = 0.010 mm	504 Mbytes≈ 0.50 "	1513 Mbytes≈ 1.5 "
20 μm = 0.020 mm	126 Mbytes≈ 0.16 "	378 Mbytes≈ 0.3 "
25 μm = 0.025 mm	68 Mbytes	204 Mbytes
50 μm = 0.050 mm	20 Mbytes	61 Mbytes
100 μm = 0.100 mm	5 Mbytes	15 Mbytes

A la vista de los datos de la tabla vemos la dificultad práctica del acceso, transmisión, carga, visualización y almacenamiento eficiente de la información imagen y consecuentemente las operaciones fotogramétricas digitales. Una de las mayores preocupaciones de la cartografía digital será utilizar, por tanto, una óptima codificación de imágenes para optimizar el almacenamiento, transferencia y procesos softcopy.

Por tanto la evaluación del almacenamiento y su logística tendrán una importancia capital en el diseño y ejecución de proyectos fotogramétricos digitales. En este contexto los algoritmos de compresión juegan un papel primordial debido a las ventajes que ofrecen, pero siempre salvaguardando la información original para realizar las tareas fotogramétricas. El seleccionar uno concreto vendrá determinado por el tipo de fotografía con la que se trabaja (monocroma, color, multibanda…), el nivel de calidad con el que debemos trabajar, el tipo de acceso a la imagen o tipo de transmisión imagen, incluso la disponibilidad del algoritmo normalizado o propietario.

33.4.1. Entropía y capacidad de informacion de una imagen digital

En imágenes del mundo real que utilizamos en *softcopy fotogrammetry* los niveles de grises están altamente correlados esto implica que una gran cantidad de información sobre el valor de gris de un pixel puede obtenerse por inspección de los pixels vecinos. Por tanto las imágenes presentan una

gran cantidad de información redundante, en base a esta circunstancia se definen los distintos método de compresión de imágenes.

Una medida del contenido de información de una imagen digital es la entropía que expresa el mínimo número de bits necesarios para la representación de una imagen sin pérdida de información. La entropía es una medida global de la correlación entre valores de grises de pixels vecinos. También mide el grado de desorden de la variable aleatoria que en este caso son los noveles de gris de los pixels

Para una imagen de n-bits con M niveles de grises ($M=2^n$) la entropía H puede calcularse como

$$H = -\sum_i p(g_i)\log_2 p(g_i)$$

donde $p(g_i)$ es el porcentaje de probabilidad de cada valor de gris, el cual se obtiene del histograma imagen. Obtenida la expresión de la definición de información en bits de un suceso, en este caso un nivel de gris, con probabilidad p(g).

DEFINIMOS EL ÍNDICE DE REDUNDANCIA de la imagen digital por la expresión

$$R = \log_2 M - H$$

Los datos e imágenes digitales en su representación digital contienen una significativa cantidad de información redundante, siendo esta característica el elemento fundamental a la hora de desarrollar algoritmos de compresión, y por tanto es fundamental considerar que sin redundancia no existe compresión. Existen tres tipos de redundancia en las imágenes digitales

- **Redundancia espacial**, debida a la correlación entre valores de pixel vecinos (imágenes de tono continuo).
- **Redundancia espectral**, debida a la correlación entre diferentes planos de color o bandas espectrales (ejemplo son imágenes satélite y sensores remotos).
- **Redundancia temporal**, debida a la correlación entre diferentes entornos en una secuencia de imágenes (entorno de vídeo).

Se hace imprescindible, también, tener en cuenta que las técnicas de compresión están basadas en la reducción del número de bits necesarios para representar una imagen eliminando o reduciendo redundancia imagen. En su evaluación tenemos distintos índices como por ejemplo

LA RAZÓN DE COMPRESIÓN (RC) que se define como

$$RC = \frac{Número\ de\ bits\ imagen\ original}{Número\ de\ bits\ imagen\ comprimida}$$

$$\Delta C_{max} = \frac{\log_2 M}{H}$$

LA RAZÓN DE COMPRESIÓN MÁXIMA, sin pérdida de información, se define como

La disminución de redundancia de una imagen digital se consigue a través de una más eficiente codificación de la información, buscando en la imagen digital la máxima razón de compresión lo que se produce cuando en la codificación de la imagen obtenemos una razón de bits por pixel igual a la entropía, o codificación entrópica.

33.4.2. Codificación

Por codificación entendemos de forma sencilla la transformación de la representación de la imagen de acuerdo con un propósito definido. Lo normal es codificar la imagen, por ejemplo, para transferirla en línea a otro sistema o almacenarla. Así, para conseguir la máxima compresión, necesitamos eliminar o reducir la correlación entre pixels, y entonces codificar estos pixels lo más eficientemente posible. Los métodos más óptimos codifican pixels independientemente (no correlados) de manera que se consigue el promedio de bits por pixel igual o cercano a la entropía imagen. Esta clase de codificación consecuentemente proporcionará la máxima razón de compresión y preservará la información. La primera implementación de tal codificación fue descrita por Shannon y fue mejorado y desarrollado por Huffman. Entre los tipos más conocidos de codificación encontramos la codificación de longitud variable (LVC), la codificación Huffmann y sus distintas variantes clasificadas como codificaciones entrópicas función de la frecuencia de aparición de cada símbolo dedicando menos bits a símbolos con mayor frecuencia, siendo la tasa de compresión de 1:5. Otras codificaciones son la codificación aritmética y la LZW (lempel, ziv, welch) por ejemplo.

Igualmente, hay unos modos de operación estándar en los sistemas de compresión de imágenes de tono-continuo:

a) codificación secuencial cada componente imagen es codificada en una exploración simple de izquierda derecha o arriba abajo

b) codificación jerárquica la imagen es codificada en múltiples resoluciones, de forma que las versiones con resolución más baja puede ser accedida sin tener que descomprimir la imagen en su resolución completa

c) codificación progresiva la imagen es codificada en exploraciones múltiples para aplicaciones en las cuales el tiempo de transmisión es largo, y el usuario prefiere ver la imagen construida por aproximaciones sucesivas múltiples.

33.4.3. Compresión imagen

La compresión imagen con el fin de reducir la cantidad excesiva de datos imagen ya ha sido mencionada como una necesidad, pero además debemos tener en cuenta que en el tratamiento imagen aplicamos técnicas de interpolación que son esenciales en la creación de imágenes en color así como otras funciones. Ambas aplicaciones necesitan y aplican algoritmos matemáticos que son usados para modificar los datos brutos imagen. La imagen digital contiene, como ya hemos avanzado anteriormente, una cantidad significativa de información redundante y en imágenes de estas características son sobre las que podemos aplicar las técnicas de compresión de imágenes. La compresión imagen es un método que minimiza el número de bytes necesarios para representar una imagen en aquellos casos en que una gran cantidad de imágenes deben ser gestionadas y archivadas como en el caso de los fotogramas aéreos de un gran proyecto de fotogrametría.

Durante los pasados años se han desarrollado un amplio número de técnicas de compresión, aunque la clasificación se hace difícil, podemos clasificar, básicamente, los métodos de compresión de imágenes en dos grupos fundamentales y generales: técnicas reversibles sin pérdida y técnicas irreversibles (con pérdida).

Compresión Reversible: reduce el número de bits necesarios para representar una imagen de forma que la reconstrucción de la imagen es numéricamente idéntica a la original sobre la base pixel por pixel. En ellos los valores digitales de la imagen descomprimida son idénticos pixel a pixel a los de la imagen original. Los programas que utilizan las técnicas de compresión sin pérdida más conocidos son típicos en las plataformas PC como es el compresor PKZIP editado por PKWare.

Compresión irreversible: permite una degradación en la reconstrucción de la imagen comprimida para reducir la razón de bits, esta degradación puede no ser visible aparentemente, las mejores compresiones se consiguen con más degradación. Admiten ratios de compresión altos y en cualquier caso se pretende que la pérdida que se produce sea lo más neutral posible, buscando un compromiso entre la calidad de la imagen descomprimida y las aplicaciones y explotación de la misma. Formatos muy conocidos que aplican técnicas irreversibles son:

Formato JPEG (imágenes estáticas, compresión 1:15), ECW (puede llegar con gran calidad 1:50), MrSID (puede llegar con gran calidad 1:50), MPEG (imágenes dinámicas audio y video).

33.5. Formatos imagen

Un formato imagen es una estructura que define como es almacenada la información digital en un fichero y como esta información será mostrada en un monitor o impresa. Los **formatos** de almacenamiento y presentación de dichas imágenes son de gran importancia tanto para su tratamiento, como para la transmisión de los mismos. Entre los más extendidos en los entornos de trabajo de fotogrametría podemos señalar el formato TIFF (Tagged Image File Format), BMP (Windows compatible bit-mapped graphics image), DIP (Device Independent Bit-map), PICT (Mac supported), EPS (Encapsulated Postscript) Photoshop y JPEG, a estos hay que añadir habituales en los entornos multimedia e Internet PCX, GIF, PSD, IMG, MPEG, ECW, MrSID, etcétera.

33.5.1. Formato TIFF *(Tagged Image File Format)*

Este formato fue desarrollado por Microsoft y Aldus corporations como método portable y almacenamiento de imágenes bit-map. Siendo, posiblemente, el más conocido y utilizado lo podemos definir como un estándar para el intercambio y presentación de imágenes en distintos entornos. El estándar TIFF incluye técnicas de compresión de datos y presenta imágenes tanto monocromas como en color. Es un formato complejo, como su nombre indica su estructura se basa en campos individuales, identificados mediante *tags* o códigos, uno exclusivo para cada tipo.

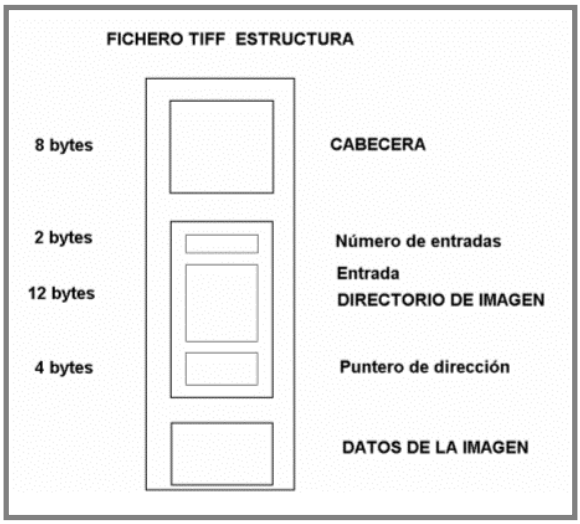


Figura 4. Estructura formato TIFF

Todo fichero TIFF esta estructurado en tres partes: la cabecera de 8 bytes, la cual apunta a uno o más directorios imagen, la IFD *(Image File Directory)* y la imagen propiamente dicha. Su forma sencilla puede verse en la figura adjunta. Polivalencia total, así como complejidad y variedad es la característica principal de este formato digital lo que permite la exportación e intercambio de información entre distintas estaciones de trabajo.

33.5.2. JPEG estándar de compresión de imágenes raster

Creado por El *Joint Photographic Expert Group* (JPEG) hace algunos años, actualmente se ha definido un nuevo estándar JPEG-2000 basado en la transformación Wavelet que soporta otros estándares de aplicaciones imagen como los más recientes ECWv2.0 y MrSID entre otros. Es un estándar internacional para la compresión de imágenes de tonos continuos (escala de grises o color) multinivel, permitiendo el almacenamiento de imágenes 24 bits (true color). Es un algoritmo completo que se utiliza no solo en los entornos de trabajo multimedia sino que también es muy utilizado en las estaciones de trabajo de fotogrametría digital y que se compone de tres módulos principales;

El sistema base comprende un algoritmo de compresión de 8 bits por pixel imagen y opera solamente en modo secuencial. En este modo secuencial, la imagen es procesada desde el principio al fin en un único paso por compresión de la primera fila de datos, seguido de la segunda fila, y así hasta el final de la imagen. **El sistema extendido** añade nuevas capacidades Una de estas aplicaciones soporta una entrada de 12 bits-pixel añadido al de 8 bit por pixel. **Función independiente** es incluida para aplicaciones que necesitan menor compresión (lossless).

SECUENCIA DE COMPRESIÓN DEL FORMATO JPEG:

- Caso imagen color: se realiza una conversión RGB a YIQ Siendo Y es la luminancia (mide el brillo); I color y Q saturación (señal que indica la profundidad del color). Las señales cromáticas I, Q son las adecuadas para comprimir con perdida sin aparente degradación visual.

- Se divide la imagen en bloques de 8x8 pixels. Cada bloque es transformado, independientemente, aplicando Transformación del Coseno Discreta **(DCT)** de imágenes de escalas de grises, es una transformación lineal, pasamos a trabajar en el dominio de las frecuencias.

Transformación discreta del COSENO para un bloque de 8 por 8 pixels

$$F(u,v) = \frac{1}{4} C(u) C(v) \sum_{j=0}^{7} \sum_{k=0}^{7} f(j,k) \cos\left[\frac{(2j+1)u\pi}{16}\right] \cos\left[\frac{(2k+1)v\pi}{16}\right]$$

j, k son coordenadas en el bloque dominio;

f (j, k) son valores de grises de los pixels del bloque;

u, v son coordenadas en dominio de las frecuencias;

C(u), C(v) es $1/\sqrt{2}$ para u,v = 0, y 1 en los otros casos.

- C**uantificación lineal** según posición de los coeficientes generados en el bloque 8x8

$$F_q(u,v) = NINT\,\frac{F(u,v)}{Q(u,v)}$$

Nivel de cuantificación se determina por el factor Q que es una tabla definida en el formato de compresión (factor de compresión) comprendido entre 0 y 300. Recomendados: B@N valores de Q=25; Color Q= 30 en las estaciones fotogramétricas.

- Codificación entrópica del tipo RLE basado en la repetición de píxeles vecinos, o bien códigos Huffman modificados.

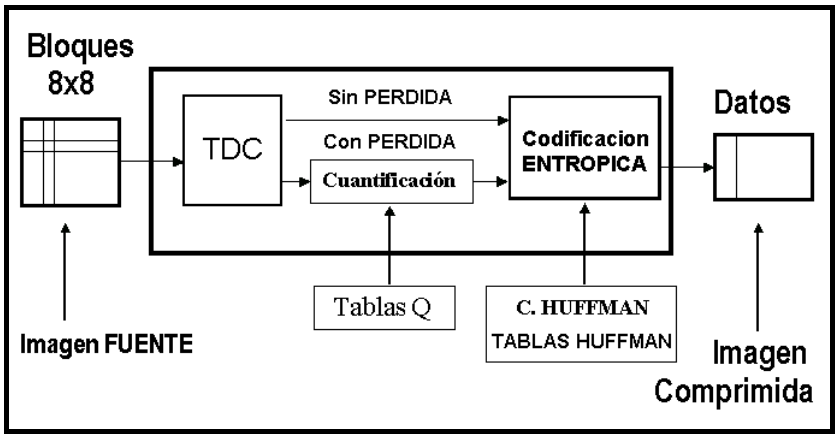


Figura 5.

El nivel de cuantificación de la compresión JPEG puede variar cambiando el factor de compresión Q. Este factor de compresión Q es variable entre 0 y 300. Los factores que conviene utilizar en fotogrametría son hasta Q=25 para imágenes en Blanco y Negro, y un factor Q=30 para imágenes en color. Seguidamente, señalar que a todo proceso de compresión le corresponde el proceso inverso de descompresión o de restauración de la imagen según la secuencia: codificación entrópica, cuantificación inversa, TDC-Inversa, obteniéndose la imagen original con pérdida pero adecuada para procesos de visualización en pantalla por ejemplo.

Breve introducción a la compresión Wavelet

Transformada Wavelet: La DWT (Discrete Wavelet Transform) aplicada a imágenes proporciona una matriz de coeficientes conocidos como coeficientes wavelet. Si a una imagen le aplicamos la DWT obtenemos 4 tipos de coeficientes: aproximaciones, detalles horizontales, detalles verticales y detalles diagonales. La técnica de compresión aplica una transformación bidimensional discreta para comprimir la información imagen. La compresión imagen con algoritmos Wavelet se aplica en los siguientes pasos:

1) Preparación de la imagen**:**

La transformación se aplica recursivamente, dividiendo la matriz imagen original en cuatro matrices transformadas con la mitad de filas y columnas.

2) Transformación WAVELET**:**

Se aplica la Transformación Discreta Wavelet (TDW) bidimensional muy similar a la transformación discreta del coseno. Las funciones base son funciones de escalado y las propiamente denominadas wavelet

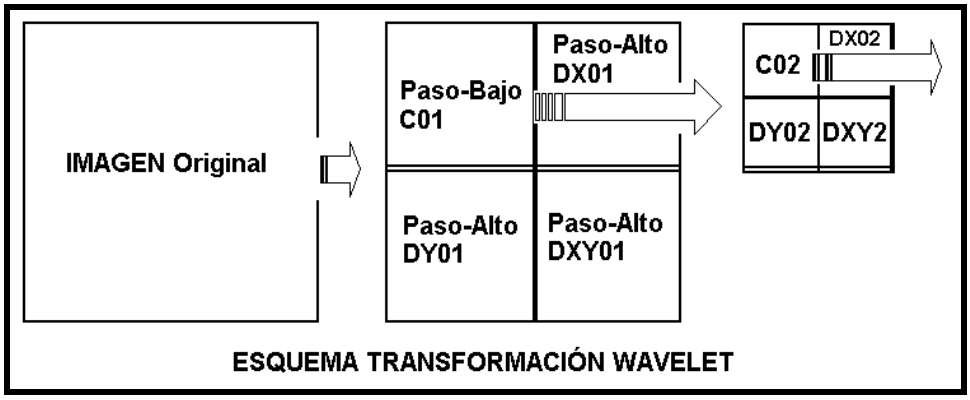


Figura 6. Transformación Wavelet

3) Cuantificación y codificación:

Estas operaciones deben permitir seleccionar los datos a tratar (en procesos digitales, de transmisión, de presentación etc.) y colocarlos en un orden adecuado de una cadena de datos para aplicar codificación entrópica.

33.6. Formatos imagen utilizados en fotogrametría digital

El entorno de trabajo de la fotogrametría digital ofrece un número razonable de formatos de intercambio de información de datos digitales entre distintas estaciones digitales, de forma que se pueden importar e intercambiar la información digital (vectorial o digital) de forma flexible y eficaz en distintas aplicaciones fotogramétricas.

Los productos cartográficos generados en una estación digital, como pueden ser mapas topográficos, distintas capas de información de un SIG (Sistema de Información Geográfico), modelos 3-D, imágenes rectificadas y ortorectificadas, mosaicos, datos MDE (Modelo Digital de Elevación), vistas perspectivas e imágenes sintéticas, animaciones aéreas, mapas temáticos, análisis espectral, necesitan de este tipo de formatos como se verá más adelante.

A continuación se presentan una relación básica de formatos imagen, vectoriales, y ficheros de formato CAD estándar utilizados para este intercambio. Igualmente, los datos de atributos capturados deben ser exportables en formatos de bases de datos estándar como puede ser el formato ASCII, con uniones que asocian características o zonas de la imagen.

ASCII American Standard Code for Information Interchange
AVI Audio Video Interleaved
JPEG Joint Phtographic Experts Group
JPEG2000 Joint Phtographic Experts Group
MPEG Motion Picture Experts Group
BMP Bitmap
RAW Raw image
TIF Tagged Image File
GEOTIF Extensión del formato TIF con georreferenciación con TFW
DEM Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevaciones)
DTED Digital Terrain Elevation Data (Modelo Digital del Terreno)
TIN Trianguled Irregular Network

DGN Formato de diseño (Micostation)

DWG Formato de dibujo (Autocad)

DXF Drawing Exchange Format (formato de intercambio

Igualmente se presentan y tres formatos muy utilizados tanto en el entrono de trabajo de las estaciones digitales como por el protagonismo que están adquiriendo actualmente en la presentación de información cartográfica e imagen en Internet e igualmente para la gestión de información imagen y diseminación para lo cual estos formatos son elementos indispensables.

33.6.1. Formato JPEG 2000

Está basado en la técnica avanzada de transformación wavelet proporcionando una mejor compresión y un sistema más avanzado y funcionalidad. Este formato JPEG 2000, completado en los inicios del año 2001, es el sucesor del original JPEG desarrollado en los años ochenta. Es capaz de comprimir una imagen completa a razón de hasta 300:1, para las imágenes en color y 50:1 para blanco y negro. Dispone de importantes mejoras en cuanto a su transmisión a través de Internet, dado que el usuario primero ve una imagen de baja resolución de la imagen completa, para progresivamente ir mostrando los detalles de la misma.

33.6.2. Formato ECW

El formato ecw es conceptualmente un formato espacial de datos de imagen codificados con transformación wavelet. La compresión está basada en la subdivisión sucesiva de una imagen en cuadrantes. La estructura ecw comprime imágenes con ratios de 100:1 hasta 250:1. El formato ecw es una tecnología de compresión que puede comprimir imágenes con cocientes de compresión altos con poca pérdida de calidad: La compresión en formato ECW puede realizarse con varias herramientas, como por ejemplo el compresor ER Mapper gratuito que se descarga a través de su página Web que comprime imágenes de hasta 500 Mb de tamaño original.

Bibliografía

[1] Arozarena y otros. 2007. Curso práctico de utilización de imágenes digitales en entornos CAD y SIG. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento

[2] Atkinson, KB. 1997. "Close Range Photogrammetry and machine vision" Whittties Publishing. Bristol

[3] Egels Yves., Kasser Michael. 2002. Digital Photogrammetry. Taylor and Francis. London

[4] Chris McGlone, with Edward Mikhail and James Bethel, 2004. Manual of photogrammetry. American Society of Photogrammetry.

[5] Greve Cliff. 1996. Digital Photogrammetry. An Addendum to the Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry.

[6] Graham R., Koh A. 2002. Digital Aerial Survey. Theory and Practice. Whittles Publishing, Scotland, UK

[7] Graham, Ron. 1998. Digital Imaging. Whittles Publishing. Scotland, UK

[8] Kraus, K. 1993. Photogrammetry Vol. 1. Dummlers Verlag. Bonn.

[9] Kraus, K. 1996. Photogrammetry Vol. 2. Dummlers Verlag. Bonn

[10] Linder Wilfried, 2006. Digital Photogrammetry A practical Course. Springer.

[11] MikhailE.M, Bethel J.S, Macglone J.CH. 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons,Inc.

[12] Schenk, T. 1999. "Digital Photogrammetry". TerraScience

Tema 34. Definición automática de superficies objeto: Operadores interés en fotogrametría. Algoritmos de correlación de imágenes en fotogrametría digital. Correlación o Matching basado en el área (ABM) por mínimos cuadrados. Determinación de escenas homólogas basado en entidades o características (FBM). Correlación automática en el espacio objeto por mínimos cuadrados. Matching relacional o correlación simbólica.

34.0. Introducción

El tema trata acerca de los distintos sistemas de correlación automática utilizados en fotogrametría digital.

La palabra "correlación" usada en este tema se usa con dos sentidos distintos. Se refiere unas veces al procedimiento estadístico conocido como correlación cruzada, basado en el cociente entre la covarianza y el producto de desviaciones estándar. Otras veces se refiere a los distintos procedimientos utilizados para encontrar puntos homólogos en los fotogramas de un par estereoscópico. En este último sentido, la palabra inglesa es *matching*. Según el contexto así será el sentido de la palabra correlación.

El tema empieza hablando de la correlación cruzada, y aunque no se pide en el tema ayuda a comprenderlo. A partir de ahí se pasa a la correlación en el rango del subpíxel y a continuación se enlaza con los operadores de interés, de interés para seleccionar zonas de búsqueda óptimas. Después de ver la correlación entre dos imágenes se explican los distintos métodos de matching.

La correlación cruzada.- La fotogrametría 3D se basa en la medición de puntos homólogos en el par estereoscópico para obtener coordenadas terreno. Los puntos medidos tienen que serlo en los fotogramas izquierdo y derecho del modelo estereoscópico. En fotogrametría analógica y analítica, los pares de puntos homólogos se identificaban visualmente y se medían manualmente, en fotogrametría digital la identificación y medición de puntos homólogos se hace automáticamente. Para encontrar la imagen derecha homóloga de la imagen izquierda de ese punto automáticamente se han desarrollado los métodos de correlación o *matching* y el primero que estudiamos es el de la correlación cruzada que está incluido en el grupo de los métodos basados en área ABM.

34.1. Correlación basada en el área (ABM)

Se verán dos procedimientos: la correlación cruzada y la correlación por mínimos cuadrados.

34.1.1. Correlación cruzada.

Se extrae una submatriz de niveles digitales del fotograma digital 1. Esa submatriz es la plantilla que define el punto que quiere correlarse. La plantilla se va comparando sucesivamente con la matriz de niveles digitales del fotograma 2. La plantilla se superpone en una posición de la matriz de búsqueda y se calcula el coeficiente de correlación. Después la matriz plantilla avanza una posición en la matriz de búsqueda y se repite el cálculo del coeficiente de correlación. Aquella posición que da el valor más alto de correlación es la buscada.

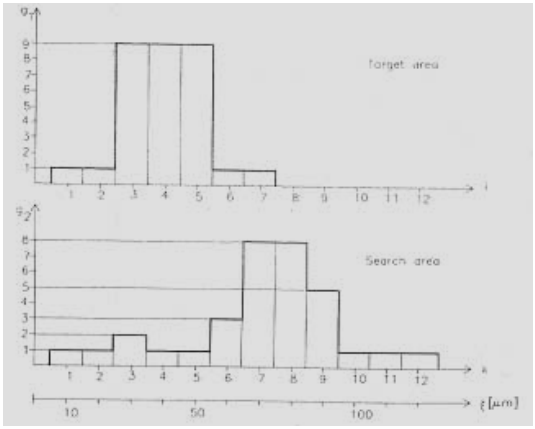


Figura 1. Arriba la matriz plantilla, abajo, la matriz de búsqueda, ambas en una dimensión.

La correlación entre la matriz plantilla y la matriz de búsqueda viene dada por:

$$\rho = \frac{\sum (g_p - \bar{g}_p).(g_b - \bar{g}_b)}{\sqrt{\sum (g_p - \bar{g}_p)^2 . \sum (g_b - \bar{g}_b)^2}} = \frac{\sigma_{pb}}{\sigma_p \sigma_b}$$

siendo: $g_p - \bar{g}_p$ = nivel digital en matriz plantilla - promedio de la matriz plantilla

$g_b - \bar{g}_b$ = nivel digital en matriz búsqueda - promedio de la matriz de búsqueda

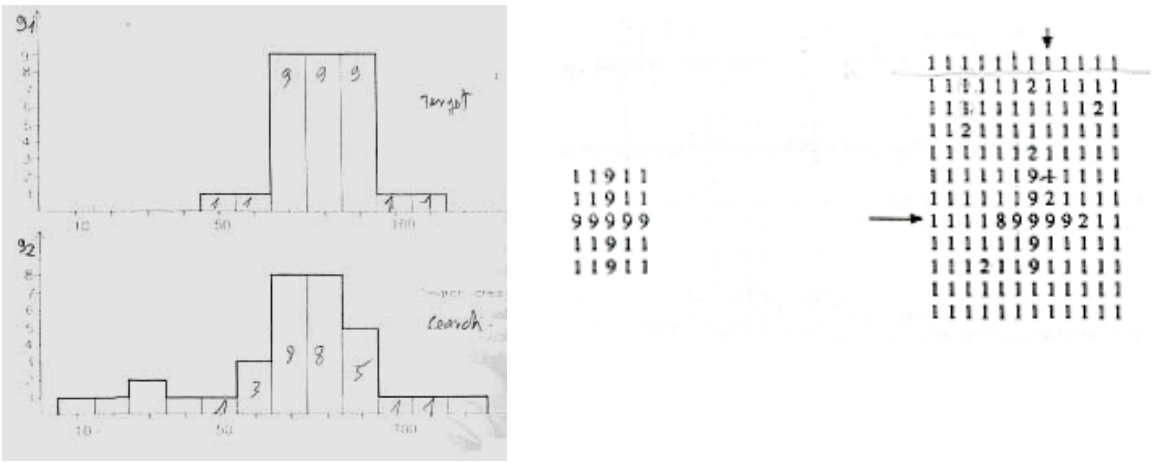


Figura 2. Las dos matrices correladas.

La matriz de búsqueda es una submatriz de la imagen en la que hay que buscar, tiene la mismas dimensiones que la matriz plantilla y varía en cada posición.

Esta forma de correlar dos imágenes tiene el inconveniente de que las distintas posiciones en las que se correla siempre son un número entero de píxeles y la mejor solución no tiene porqué ser un número exacto, según se ve en el gráfico.

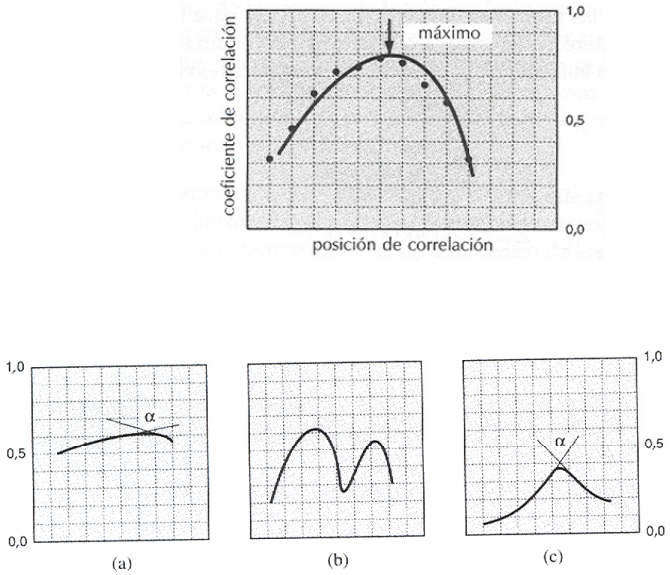


Figura 3. Distintos casos que pueden presentarse. La abcisa representa la posición y la ordenada el valor ρ

En ciertos casos no es tan fácil elegir el valor máximo: ver figura 3

Por eso se ha desarrollado la correlación en el rango subpíxel, que se basa en los mínimos cuadrados y a continuación se describe.

Asumimos que se ha encontrado la posición (en coordenadas píxel, fila, columna) y que esa posición dista de la óptima la cantidad " d " , inferior a un píxel. Con un desplazamiento de la matriz plantilla igual a : " d " se encontraría el máximo de correlación. Las posiciones de las dos submatrices de densidades, b de búsqueda y p de plantilla, están relacionadas por: gb (x) = gp (x+d)

Además de diferir en la posición, también difieren en las densidades (en la posición óptima todavía quedaría una pequeña diferencia en brillo y contrate), por tanto añadimos una componente de correcciones sistemática, brillo y contraste:

$$V + g_b(x) = c\, g_p(x+d) + b$$,siendo V el residuo.

El contraste equivale a una escala c y el brillo a un desplazamiento b.

Una ecuación como esta se escribe para cada píxel de la matriz plantilla y su homólogo en la matriz de búsqueda, después de haber correlado y haber encontrado la posición x.

El modelo matemático se puede linealizar. Como d es pequeño, se puede reescribir el modelo:

(1) $$V + g_b(x) = c\,(g_p(x) + d\, g'_p(x)) + b$$

Siendo:

g p (x) el nivel digital del píxel en la posición x en la matriz plantilla

g b (x) el nivel digital del píxel en la posición x en la matriz de búsqueda

g´p (x) pendiente en el perfil de densidades = (gb i+1 - gb i-1) / (tamaño píxel)

Haciendo el cambio de variable: k = c . d quedaría:

$$V + g_b(x) = c\, g_p(x) + k\, g'_p(x) + b$$ y ordenando términos:

(2) $$V = k\, g'_p(x) + c\, g_p(x) + b - g_b(x)$$

que es la forma de las ecuaciones de observación. Se resuelve por mínimos cuadrados según: $A^T Ax = A^T L$ obteniendo el vector de parámetros: | c k b | y después se deshace el cambio de variable:

d = k / c De los parámetros calculados nos quedamos con d, pues (x + d) da la posición de correlación óptima en rango subpíxel.

De la traza de la matriz inversa de las ecuaciones normales se obtiene la desviación estándar de los parámetros ajustados y puede comprobarse que la precisión obtenida en posicionamiento es aproximadamente un orden de magnitud superior al tamaño de píxel.

Toda la explicación se ha hecho para una supuesta correlación en 1 dimensión. Habría que extenderlo a 2 D, obteniendo kx y ky.

34.1.2. Correlación por mínimos cuadrados

La idea de la correlación mínimos cuadrados es minimizar las diferencias de nivel digital entre la plantilla y la ventana de búsqueda por lo que la posición y forma de ésta última son parámetros que se determinan en el ajuste, es decir, la posición y forma de de la ventana de búsqueda son cambiadas hasta que las diferencias con la plantilla, diferencias en niveles digitales, son mínimas. Suponiendo por un momento que la matriz de búsqueda y la matriz plantilla coinciden en posición, las diferencias en los niveles de gris son causadas por distintos factores:

- La iluminación y la reflectancia no son iguales en las dos imágenes
- El escaneado o el postproceso (filtros, ecualizado, etc.) no es el mismo
- Distorsión geométrica debida a la proyección central y relieve.

Por tanto, habrá unas diferencias de brillo y contraste que se compensan con una transformación radiométrica y unas diferencias en posición que se compensan con una transformación geométrica, las cuales es mejor tratarlas por separado para evitar el problema de la correlacción de parámetros. Primero se realiza una ecualización del histograma y después se pasa a calcular por mmcc la transformación geométrica.

La ventana plantilla y la ventana de búsqueda son zonas pequeñas y están relacionadas por la proyección central con la superficie terreno. El terreno puede sustituirse por un plano y la proyección central por una proyectiva de 8 parámetros que puede reducirse a una afín de 6 parámetros por tratar con imágenes aéreas en las cuales y para zonas pequeñas los rayos ópticos se pueden considerar como paralelos.

Así pues , la correlación por mínimos cuadrados se basa en la obtención de los parámetros de la transformación afín que minimiza los residuos entre los niveles de gris entre las matrices plantilla y de búsqueda.

En lo que sigue, m(i,j) se refiere a la ventana de búsqueda original y m (x,y)a la ventana de búsqueda transformada.; i, j son valores enteros de coordenadas píxel mientras que x,y, son valores reales de la ventana transformada.

Se tiene: m (x,y) = m [Tg (i,j)]

x = Tx (i,j) y = Ty (i,j)

siendo Tg una transformación geométrica y m( ) la matriz de búsqueda.

La transformación, por tanto, sería:

(3) $X = t_0 + t_1 \cdot i + t_2 \cdot j$

$Y = t_3 + t_4 \cdot i + t_5 \cdot j$

Después de aplicar la transformación las ecuaciones de observación son de la forma:

V (i,j) = p (i,j) – m (x,y) siendo p ( ) la matriz plantilla.

Es decir, los residuos son la diferencia entre los niveles de gris de la matriz plantilla y la matriz de búsqueda transformada.

Las ecuaciones linealizadas son de la forma:

(4)
$$m(x,y) \approx m^0(x,y) + \frac{\partial m(x,y)}{\partial Tx}\left[\frac{\partial Tx}{\partial t_0}\Delta t_0 + \frac{\partial Tx}{\partial t_1}\Delta t_1 + \frac{\partial Tx}{\partial t_2}\Delta t_2\right] + \\ + \frac{\partial m(x,y)}{\partial Ty}\left[\frac{\partial Ty}{\partial t_3}\Delta t_3 + \frac{\partial Ty}{\partial t_4}\Delta t_4 + \frac{\partial Ty}{\partial t_5}\Delta t_5\right]$$

Las derivadas parciales son las siguientes:

(5)
$$\frac{\partial Tx}{\partial t_0} = 1 \quad \frac{\partial Tx}{\partial t_1} = x \quad \frac{\partial Tx}{\partial t_2} = y$$

$$\frac{\partial Ty}{\partial t_3} = 1 \quad \frac{\partial Ty}{\partial t_4} = x \quad \frac{\partial Tx}{\partial t_0} = y$$

$\frac{\partial m(x,y)}{\partial Tx} = g_x$ = gradiente en dirección X , $\frac{\partial m(x,y)}{\partial Ty} = g_y$ = gradiente en dirección Y.

Finalmente: $m^0(x,y) = m(i,j)$, valores aproximados

$l = p(i,j) - m(i,j)$ vector de los términos independientes.

Conociendo los valores de los coeficientes se obtiene la matriz de diseño de dimensiones n x m siendo n el tamaño de la matriz patrón o plantilla y m el tamaño de la matriz de búsqueda.

La matriz de diseño se forma ordenando los coeficientes:

Píxel	Δt_0	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5	const
1, 1	g_{x1}	$g_{x1} \cdot x_1$	$g_{x1} \cdot y_1$	g_{y1}	$g_{y1} \cdot x_1$	$g_{y1} \cdot y_1$	$t(1,1) - m(1,1)$
2, 1	g_{x2}	$g_{x2} \cdot x_2$	$g_{x2} \cdot y_1$	g_{y1}	$g_{y1} \cdot x_2$	$g_{y1} \cdot y_1$	$t(2,1) - m(2,1)$
•	•	•	•	•	•	•	
•	•	•	•	•	•	•	
•	•	•	•	•	•	•	
n, m	g_{xn}	$g_{xn} \cdot x_n$	$g_{xn} \cdot y_m$	g_{ym}	$g_{ym} \cdot x_n$	$g_{ym} \cdot y_m$	$t(n,m) - m(n,m)$

Tabla 1. Matriz de diseño

La solución es: $V = A\hat{t} + l$ caso paramétrico de los mmcc.

$\hat{t} = (A^t PA)^{-1} A^t Pl$, vector de los parámetros ajustados

$\hat{\sigma}^2 = \frac{V^t PV}{m.n-6}$ varianza de referencia a posteriori.

La solución tiene que ser iterativa pues ha habido que linealizar el modelo funcional.
La primera iteración se inicia con una posición aproximada en la matriz de búsqueda, se calculan los parámetros, y las nuevas coordenadas. A esas nuevas coordenadas hay que asignarles unos niveles de gris nuevos mediante un remuestreo con una interpolación bilineal.

Este remuestreo tiene sus problemas pues el tamaño del píxel ha cambiado y las resoluciones de las matrices de búsqueda y de búsqueda transformada, no son iguales. Además los niveles de gris obtenidos en el remuestreo están correlados pero si se desprecia esta correlación es muy pequeña la influencia en los parámetros.

Después de remuestrear se calculan los residuos y si no están dentro del umbral, se calcula la segunda iteración actualizando la matriz de diseño a partir de las coordenadas obtenidas en la iteración anterior. Así hasta que el proceso cumpla el criterio de convergencia. Cuando el proceso converge el punto conjugado del centro de la plantilla es el centro de la ventana de búsqueda después de ser transformada. En posición y forma.

El tamaño de la plantilla patrón es clave. Si es grande la correlación es buena pero actúa como un filtro suavizado. Si la ventana es pequeña se reduce la precisión y la fiabilidad, la posición encontrada puede ser falsa.

Para imágenes con calidad y mucho detalle la práctica aconseja matrices de 15 x 15, y si las imágenes tienen ruido o diferencias significativas en brillo y contraste, se recomiendan matrices de 21 x 21. También se pueden utilizar procesos adaptativos en los que el tamaño cambia automáticamente.
El método basado en mínimos cuadrados LSM es lento por ser iterativo con remuestreo pero tiene la ventaja de la precisión.
Antes de todo el proceso de la correlación iterativa, hay que preparar las imágenes con una transformación radiométrica consistente en la ecualización del histograma.

34.2. Correlación basada en características. (FBM)

Los métodos anteriores trabajan directamente con los niveles de gris, los cuales contienen poca información explícita acerca del espacio objeto, motivo por el cual estos procedimientos no son muy precisos. En los métodos que se tratan a continuación, lo que se correla no es una submatriz de píxeles, sino características de entidades tales como puntos aislados, bordes, regiones. Con estos métodos se resuelven problema de ambigüedades.

Se trata mas que de cómo hay que correlar de encontrar lo que hay que correlar.

Estos métodos vienen de la visión por ordenador de finales de los años setenta, cuando se vio que la estereoscopía humana se basaba mas en la detección de bordes que en el encontrar plantillas similares de grises.
Estos métodos tienen en común que son procesos monoculares que se aplican de manera independiente sobre cada fotograma.

34. 2.1. Extracción de puntos de interés

Una de las tareas que hay que hacer en fotogrametría es la aerotriangulación la cual se basa en la medición de puntos de paso entre fotogramas. A partir de las coordenadas medidas de esos puntos en el sistema imagen mas las coordenadas de algunos puntos medidos en campo y en sistema imagen, es posible determinar las coordenadas terreno de todos los puntos de pasa además de los parámetros de orientación exterior de cada fotograma. Para realizar automáticamente este procedimiento, la cuestión es: como seleccionar por el sistema informático puntos homólogos en varios fotogramas para medirlos posteriormente. Aquí es donde aparece la extracción de puntos de interés la cual se basa pequeñas zonas de gran varianza o puntos de características diferenciadas mediante un operador de interés, como el de Moraavec; que se basa en la medición de las diferencias de una submatriz de la imagen en

relación con sus alrededores para calcular después las varianzas de pequeñas áreas y umbralizarlas.

O el operador de Förstner, con el que se pueden identificar esquinas y elementos circulares, ofreciendo precisión subpíxel y siendo invariante de la rotación. En el capítulo siguiente se profundiza en los operadores de interés. Después de obtener todos los puntos posibles en todos los fotogramas se aplica una correlación por área sobre cada punto localizado para encontrar las posiciones de los puntos homólogos en los otros fotogramas.

34. 2.2. Extracción de bordes

Se utilizan filtros de paso alto. Se sabe que los operadores basados en calcular diferencias, amplifican el ruido, por lo que es necesario un suavizado. El operador LoG (Laplaciano del Gausiano) cumple la doble función de detectar bordes y suavizar el resultado. El resultado de aplicar el filtro Laplaciano sobre una posición de la imagen es una magnitud escalar, no como los filtros de gradiente que son vectoriales. El filtro Gausiano, también da un escalar y de aquí que se puedan combinar estos dos filtros en uno solo, el LoG.

El operador laplaciano viene dado por $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ y es invariante de la rotación del sistema de coordenadas, amplifica el ruido y es un escalar como ya se ha dicho.

El filtro gaussiano tiene la propiedad de que la transformada de Fourier de la imagen filtrada , se conserva la forma de campana en el histograma y se suprime uno de los problemas del filtrado, la función de transferencia de una ventana finita es infinita..

La función de Gauss en dos dimensiones viene dada por: $g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$

Y su transformada de Fourier: $G(\mu,\nu) = e^{\frac{-(\mu^2+\nu^2)}{2\sigma^2}}$

La primera derivada es : $\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{-x}{\sigma^2}\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$

$$\frac{\partial g}{\partial y} = \frac{-y}{\sigma^2}\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

y la segunda derivada: $\nabla^2 g = (\frac{x^2+y^2-2\sigma^2}{2\pi\sigma^6}) e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$

el filtro se extiende hasta el infinito por ser asintótico, para llevarlo a la práctica hay que discretizarlo y truncarlo:

$$\mathrm{LoG} = \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 4 & 4 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 7 & 10 & 10 & 10 & 7 & 3 & 1 \\ 2 & 7 & 11 & 6 & 0 & 6 & 11 & 7 & 2 \\ 4 & 10 & 6 & -24 & -46 & -24 & 6 & 10 & 4 \\ 4 & 10 & 0 & -46 & -80 & -46 & 0 & 10 & 4 \\ 4 & 10 & 6 & -24 & -46 & -24 & 6 & 10 & 4 \\ 2 & 7 & 11 & 6 & 0 & 6 & 11 & 7 & 2 \\ 1 & 3 & 7 & 10 & 10 & 10 & 7 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 4 & 4 & 4 & 2 & 1 & 0 \end{matrix} . 10^{-3}$$

La cantidad $w = 2\sqrt{2}\sigma$ es el ancho del lóbulo central y al ser mayor este valor, también es mayor el nivel de ruido suprimido (o mayor nivel de generalización) en los bordes obtenidos.

El operador sólo obtiene los puntos que forman los bordes pero no define que puntos son los que forman cada borde pues los bordes son entidades que tienen que tener un punto inicial, un punto final y una lista ordenada de valores intermedios. Es como si solo hubiera un borde único. Cada valor es un número rel, próximo a cero, y coincide con la transición de positivo a negativo, o al revés. Así se obtienen las llamadas líneas de cruce cero.

El operador LoG es en teoría un filtro cuya suma de coeficientes es cero, suponiendo que se tomen los infinitos coeficientes pues LoG es asintótico, pero en la práctica hay que truncarlo a un valor finito y entonces los valores negativos son predominantes, por lo que se produce un error en la línea extraída. Siendo L el nivel de gris en la parte izquierda de la línea detectada y R en la derecha, Slog es la suma del operador LoG y So la suma de la columna central del Log. El error en posición Δx y el error Δz en el nivel de gris vienen dados por:

$$\Delta z = 1/2 \ \mathrm{Slog} \ (L+R) \tag{6}$$

$$\Delta x = \frac{\Delta z}{So(L-R)} = (\frac{1}{2}\frac{S\log}{So})\frac{L+R}{L-R}$$

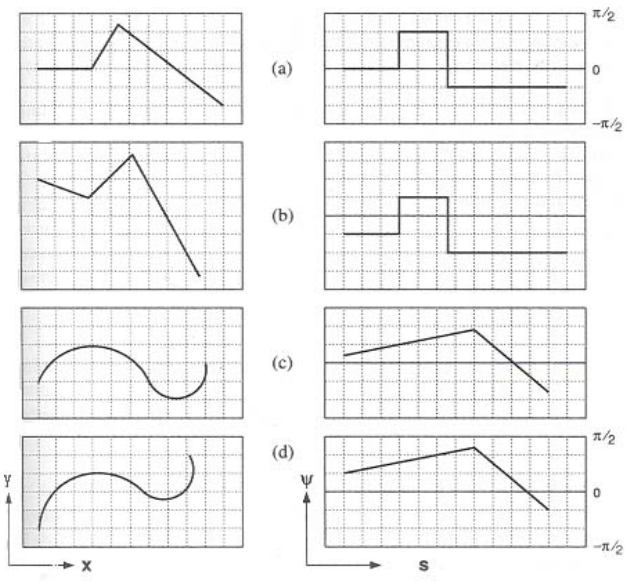
Δx es proporcional al error del operador e inversamente proporcional al contraste del borde extraído, por lo que el error será mayor cuanto menor sea la diferencia de grises en los extremos del borde detectado. Estos errores se manifiestan más claramente en los alrededores de las esquinas pues éstas son extraídas no como esquinas en ángulo recto sino redondeadas. Se utilizan operadores que son buenos en las esquinas, como el de Förstner para marcar zonas peligrosas para el LoG.

Para detectar las líneas de borde se empieza por examinar fila a fila toda la imagen . Primero se marcan los píxeles de borde de una fila , después se marcan los píxeles de borde de la fila siguiente y por último se examina si el marcado de la 1ª fila tiene en la segunda fila un vecino próximo marcado y en ese caso e unen para formar una línea de borde. Si no hay conexión se considera el punto marcado como el principio de otro borde. Este método tiene el inconveniente de las ambigüedades que pueden producirse en la continuidad.

Otro método consiste en ir siguiendo el borde, si se encuentra un píxel de borde, su continuación debe estar en un área de 3 x 3. La continuidad se consigue busscando el píxel que da menor cambio en la orientación.

- **El método ψ - S**

Es una conversión del dominio Y-X al dominio ψ - S en el que una recta con pendiente se transforma en una recta horizontal con ordenada ψ proporcional a la pendiente, una curva se transforma en una recta de pendiente proporcional a la curvatura y una rotación se transforma en un desplazamiento vertical.



Una línea poligonal en el dominio ψ - S equivaldrá a una segmentación curvilínea en el dominio Y-X y los vértices en el dominio ψ - S se corresponderán con cambios de curvatura en el dominio Y-X. Los bordes que sean similares en el dominio Y-X también lo serán en el dominio ψ - S por lo que las búsquedas de líneas homólogas se pueden realizar en ψ - S pero ahora con un grado menos de complejidad.

Figura 4. Izquierda: dominio espacial. Derecha: dominio paramétrico.

La forma de trabajar es convertir primero todos los bordes detectados en un par de fotogramas de X-Y a ψ - S y posteriormente realizar la correlación en ψ - S.

Las ambigüedades se resuelven usando un controlador de consistencia como el modelo de paralajes que puede obtenerse de un histograma 2-D. Primero se estudian las correlaciones globales, es decir, las posibles correlaciones correctas se sitúan dentro de una elipse cuyo semieje mayor e paralelo a la dirección del vuelo y cuyo tamaño depende de la topografía del

terreno. El semieje menor está determinado por las discrepancias en los parámetros de la orientación exterior.

Después se estudian las restantes correlaciones de un modo local, dando preferencia a aquellas que pertenecen al mismo borde.

34. 2.3. Detección de regiones o zonas

Se utilizan métodos de umbralización de histogramas o de segmentación de texturas.
Las mejores zonas para extraer son aquellas que se presentan invariantes a las diferencias de iluminación y perspectiva.

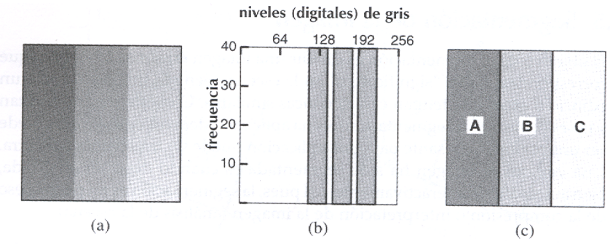


Figura 5. Izquierda: imagen original. Centro: histograma. Derecha: imagen umbralizada.

El éxito de la umbralización depende además de las frecuencia de los niveles de gris, de la posición de éstos en la imagen pues los píxeles tienen que estar agrupados en la imagen en zonas diferenciadas y si en el histograma las frecuencia se agrupan en torno a valores de manera que éste se puede seccionar y en la imagen están mezclados los píxeles, la umbralización será absurda:

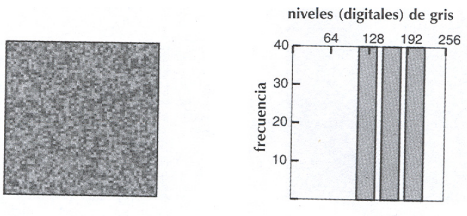


Figura 6. Izquierda: imagen original. Derecha; Histograma. La umbralización sería absurda. No se puede segmentar la imagen aunque el histograma tenga regiones diferenciadas.

En el otro extremo, cuando las frecuencias son muy parecidas aunque en la imagen haya zonas diferenciadas, no se podrá sectorizar el histograma:

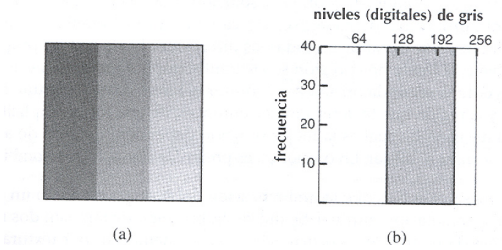


Figura 7. Izquierda: imagen original. Derecha: Histograma. Tampoco se puede umbralizar la imagen por no haber un histograma sectorizado.

Una aplicación de la segmentación es la localización de marcas fiduciales. Umbralizando la imagen se obtiene una imagen binaria de blancos y negros. Después se pasa a un proceso de correlación basado en área.

34.3. Operadores de interés

A diferencia de los métodos de correlación que tratan de cómo se correla, los operadores de interés tratan sobre que hay que correlar. La idea es encontrar en una imagen zonas de interés que darán una buena correlación en la otra imagen. Por ejemplo, para hacer la aerotriangulación hay que seleccionar puntos bien definidos en un fotograma y que tengan homólogo en el fotograma siguiente, son los puntos de paso o puntos de enlace o puntos pug o tie points. En fotogrametría analítica los puntos de enlace los selecciona el operador humano, en fotogrametría digital en su forma mas automática, se necesitan operadores que seleccionen puntos en un fotograma con suficientes garantías de ser encontrados o correlados en los fotogramas colindantes. D aquí los operadores de interés.

En el apartado anterior se vio que las precisiones en el desplazamiento dependen principalmente de las diferencias en los niveles digitales y esas diferencias en el nivel digital eran los coeficientes de k en la ecuación 1. Las diferencias de nivel digital son la derivada . Extendiendo el modelo matemático a x-y,

$$V + gb\,(x,y) = c\ gp\,(x+dx\ ,\ y+dy) + b$$

$$V + gb\,(x,y) = c\ (\ gp\,(x,y) + dx\ g'px\,(x,y) + dy\ g'py\,(x,y)\ ) + b$$

Y haciendo $kx = dx \cdot c$ y $ky = dy \cdot c$ queda:

$$V + gb\,(x,y) = c\ \ (gp\,(x,y) + kx\ g'px\,(x,y) + ky\ g'py\,(x,y)\ ) + b$$

Y ordenando términos se obtienen las ecuaciones de observación:

(7) $$V = kx\ g'px\,(x,y)\ +\ ky\ g'py\,(x,y)\ + c\ \ gp\,(x,y) +\ b - gb\,(x,y)$$

se llega a la matriz de ecuaciones normales con los cuatro coeficientes para los desplazamientos en x e y. Se desprecian los coeficientes de c y de b.

$$N = \begin{pmatrix} \sum g_x'^2 & \sum g_x' g_y' \\ \sum g_x' g_y' & \sum g_y'^2 \end{pmatrix}$$

Los sumatorios se extienden a todos los píxeles de cada ventana en las que se realizará mas tarde la correlación. El tamaño de las ventanas mas apropiado, según la práctica, es de 7 x 7 píxeles. La inversa Q de la matriz de coeficientes de las ecuaciones normales nos da la precisión de las incógnitas:

$$Q = N^{-1} = \frac{1}{\det(N)} \begin{pmatrix} \sum g_y'^2 & -\sum g_x' g_y' \\ -\sum g_x' g_y' & \sum g_x'^2 \end{pmatrix}$$

Así tenemos las condiciones para seleccionar ventanas en la imagen de búsqueda, con mayores garantías de correlación. Y de aquí se desprenden dos criterios:
Criterio w: usar la traza de la matriz Q : w = tr(Q) = tr(N) / det(N).

Se buscan los mínimos locales y si están dentro de un umbral, las submatrices que tienen esos mínimos serán candidatas a la correlación óptima. El valor de umbral puede obtenerse calculando la traza de toda las posibles matrices de búsqueda. Los test demuestran que un tercio del promedio de todas las trazas posibles se puede tomar como umbral.

El factor w detecta si una zona tiene unos niveles digitales homogéneos o al contrario, lo que es malo para la correlación y en cuyo caso se hacen 0 las derivadas, o si en la zona hay patrones lineales o bordes los cuales son buenos para la correlación. Sin embargo, el criterio w no es suficiente pues puede haber bordes en la zona y cortare con ángulos muy agudos, lo cual no da buena intersección y por tanto buena correlación.

Por eso hay que definir un nuevo factor, el factor q y trabajar con w y con q. Primero se seleccionarían todas las zonas que dan un w dentro del umbral (un tercio del promedio de las trazas posibles) y después se filtran con el factor q reduciendo así el número posible de áreas de interés. Este factor q tiene que ser al menos 0.75 según tets realizados.

El factor q consiste en que la elipse de error obtenida de la matriz Q sea lo mas próxima al círculo. Se define q como:

$$q = 1 - \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right)^2 = \frac{4 \det(N)}{tr^2(N)}$$

siendo $\lambda_1 y \lambda_2$ los autovalores de la matriz Q los cuales son proporcionales a los cuadrados de los semiejes de las elipses de error en las correspondiente zonas.

Si hay en la zona de búsqueda bordes paralelos al eje X (o al eje Y), las derivadas o incrementos en ese borde de dirección X es = 0 y en la matriz N el determinante se hace = 0. Hay que buscar zonas con valores próximos a 1, que se cumple cuando :

$\sum g_x'^2 = \sum g_y'^2 \neq 0$ y además $\sum g_x' g_y' \neq 0$ es decir, cuando hay variación de niveles digitales en las dos direcciones de ejes de coordenadas (primera condición) y además están distribuidas uniformemente (segunda condición).

34. 3.1. El operador de Förstner

Se trata de utilizar el factor q visto anteriormente para buscar elipses con máximas diferencias entre semiejes en lugar de buscar elipses lo mas circulares posibles. Cuanto mayor sea la diferencia entre eje mayor y eje menor, mas fuertemente el eje mayor marca la dirección de un borde en el centro de la elipse.

Este operador además de determinar el "peso" del borde encontrado como hacen otros operadores, también marca la dirección.

En las proximidades de la esquina hay un error en posicionamiento pero no justo en la esquina. Este operador fija la posición de la esquina exactamente, lo cual no hace el operador LoG.

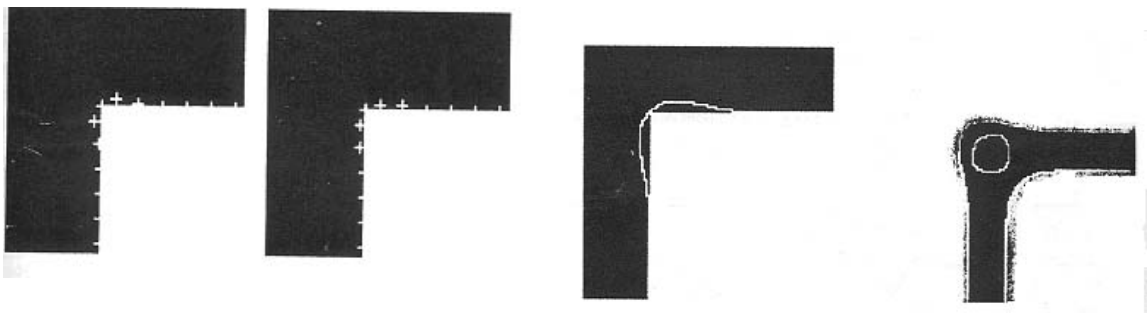


Figura 8. Extracción de bordes con distintos operadores. Izquierda: Förstner con matriz de 5x5c. Derecha: operador LoG con matriz de 3x3. Las líneas blancas sonlas de igual valor LoG.

Un problema que está al acecho en los procedimientos de extracción de líneas es que antes del proceso de extracción, la imagen se somete a una reducción en la resolución, bien para suprimir ruido o bien para reducir la cantidad de datos, como en la estructura de imágenes piramidales, por lo que se producen ambigüedades en las imágenes de las estructuras de objetos finos y hay que tener en cuenta al pie de la letra el teorema del muestreo para que no se pierdan líneas o se produzca el efecto de "alising". Ej.:Si se remuestrea con píxeles de 20 micras sólo se pueden reconstruir objetos de mas de 40 micras.

34.4. Correlación en el espacio objeto

Aunque no los desarrollaremos en esta exposición, existen otros modelos matemáticos que permiten obtener la correlación entre puntos o ventanas homólogas en el dominio imagen. Estas soluciones se denominan y se basan en el planteamiento de los principios de correlación por mínimos cuadrados imagen a imagen basados en el área (Ackermann, 1982; Förstner, 1982, 1984; Grün, 1985; Rauhala, 1986 etc).

La correlación mínimos cuadrados en el espacio objeto es esencialmente similar a la correlación imagen a imagen (LSM -*Least squares matching*-); sin embargo, comienza desde un punto de vista levemente diferente. Es decir, que el origen de cada elemento, cosa u objeto registrado en la imagen está localizada en el espacio objeto, y los procesos automáticos (mínimos cuadrados o no), fotointerpretación, e inteligencia artificial deben integrarse para realizar todas las funciones mutuamente soportadas en el espacio objeto (Helava, 1988).

El bien conocido proceso (LSM) puede, entonces, extenderse al espacio objeto definiendo detalles particulares del objeto que vemos en la imagen tanto radiométricos como geométricos. Es decir realizamos una inversión (mediante transformaciones) de los procesos imagen sobre el espacio objeto. Si la función imagen inversa se formula correctamente, con una correcta determinación de los parámetros, obtendríamos uno y algunos detalles del mismo objeto de dos detalles de imágenes homólogas, tanto geométricamente como radiométricamente. La correspondencia (*matching*) es transferida al espacio objeto, los parámetros del modelo matemático son modificados continuamente hasta que los detalles del objeto obtenido de las imágenes concuerdan unos con otros la máximo posible.

Si conseguimos una solución, sabemos que hemos conseguido una correspondencia exacta de las imágenes homólogas extraídas, además de todos los parámetros de la determinación de la imagen inversa (parámetros radiométricos). Es posible, de esta manera, obtener unos valores de intensidad

ideal de la superficie objeto, estas intensidades objeto pueden determinarse de las intensidades de las imágenes por correcciones de los efectos debidos a la dirección de la toma e iluminación.

Lo sorprendente aquí es que no solo los procesos de correlación capturan y generan la superficie objeto tridimensional, sino que el problema de la producción de ortofotos se resuelve al mismo tiempo (asigna valores de tonos grises a una posición del sistema de referencia y correlación de tonos grises de las posiciones del mosaico)

Este proceso no está limitado a la correspondencia de dos imágenes; no existe "imagen de referencia" y tampoco "imagen de búsqueda" como se planteo en matching (LSM) basado en el área por mínimos cuadrados, sin embargo se puede mantener el ajuste mínimos cuadrados, con la ventaja del calcular los errores producidos del análisis de los gráficos de precisión.

El método supone introducir el término "surfel" (surface element) en el desarrollo de Wrobel o bien el término "groundel" (ground element) en terminología Helava, además del conocido de pixel.

Un "surfel/groundel" como elemento básico en el espacio objeto tiene propiedades particulares reflectivas, tiene coordenadas 3-D y una superficie de pendientes; junto a esto una densidad óptica particular.

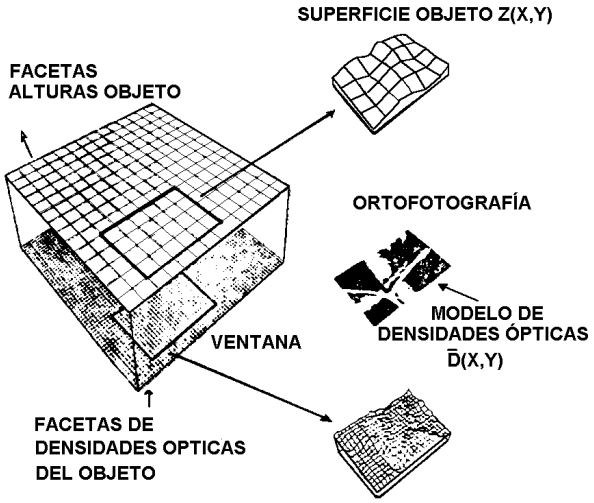


Figura 9. Facetas en el espacio objeto

Igual que para los pixels, se puede derivar, también, una estructura piramidal de los *surfel/groundel*. Por tanto será conveniente fijar el tamaño de un surfel original, sobre el tamaño del pixel proyectado en la superficie terreno, en algunos casos puede ser significativamente más grande.

Definición: "surfel/groundel" (concepto abstracto) es la unidad en el espacio objeto similar al pixel en el espacio imagen que tiene aproximadamente el tamaño del pixel imagen proyectado sobre el terreno.

Cada *groundel* tiene un centro de coordenadas X,Y,Z tridimensionales, así como una serie de atributos asignados, como pendiente, características radiométricas y densidades intrínsecas (supuestas). Pueden construirse jerárquicamente grandes surfels/groundels por un filtro pasa-bajo y agregación de características. Conjuntos jerárquicos de escala 2^n o 2^{2n} con n=1,2...,5 han resultado de gran ayuda en correlación de terrenos difíciles (estructura de imágenes piramidal).

El concepto de surfel/groundel es abstracto. No se pueden imaginar surfels alineados sobre el terreno de la misma forma que los pixels sobre la imagen. Al ser abstracto, el sistema de groundels es fácilmente adaptable. Pueden ser orientados en la dirección epipolar o alineados con el sistema de coordenadas terreno; su tamaño puede seleccionarse según un amplio rango de valores, siendo no más pequeño que el pixel proyectado.

El concepto de groundel fue utilizado originariamente en uno de los métodos convencionales de correlación, específicamente como parte de la correlación por relajación jerárquica (Hierarchical Relaxation Correlation -HRC-) y desde 1985 ha sido combinado con la correlación mínimos cuadrados.

34.4.1 Modelo funcional de la correlación en el espacio objeto

El modelo funcional representa el proceso de proyección del surfel/groundel. La ecuación general de la proyección inversa del surfel a la imagen se describe como (el superíndice b indica cantidades referidas a la imagen b=1,2,...,B)

$$(8)\quad D^b(x,y) + v_{D^b} = D^b[C(x,y;P_{c_j}),\ \overline{D}(X,Y;D_{kl}),\ \overline{Z}(X,Y;Z_{rs}),L(X,Y,P_L)]$$

La función $D^b(x,y)$ representa la densidad en la imagen; las observaciones υ_{Db} define el ruido que deteriora la densidad imagen. La función $D^b[]$ representa la modelización de la proyección conjunta. Se tiene en cuenta la siguiente parametrización.

$C(x,y;P_{C,j})$ modelo de la cámara con los parámetros $P_{C,j;}$ donde los parámetros C corresponden a la transformación geométrica (orientación interna y externa), siendo j los parámetros radiométricos. Los parámetros se conocen si utilizamos una cámara orientada y calibrada.

$\overline{D}(X,Y;P_{kl})$ función densidad óptica en la región objeto, definida por k-1 valores D_{kl} (k=1,2,...) como aproximación de la función densidad real.

$\overline{Z}(X,Y,Z_{rs})$ función superficie objeto definida por los valores r y s Z_{rs}(r,s=1,2,....) como aproximación de la función de superficie real Z.

$L(X,Y;P_{L,t})$ modelo de iluminación con una función de luz L y los parámetros $P_{L,t}$.

Los parámetros contenidos en $D^b[]$ pueden determinarse de forma que las diferencias entre $D^b[]$ y $D^b()$ sean un mínimo. La siguiente ecuación es la ecuación de corrección de un ajuste por mínimos cuadrados. Vemos que $\upsilon_D{}^b$ consiste no solo en ruido estocástico, como inicialmente suponemos, sino también compensa el error o errores que han sido modelados por $D^b[]$

El modelo imagen general puede ser complicado (modelización de las propiedades de la fuente de

$$v_{D^b}(x,y) = D^b[...] - D^b(...) \quad 1$$

luz, la atmósfera y reflexiones de la superficie).

Normalmente se procede imponiendo unas simplificaciones, tales como

- Uso de un modelo de iluminación constante para todos los fotogramas (en caso de fotografía aérea, iluminación constante durante la misión fotográfica el modelo de iluminación puede ser obtenido de la ecuación anterior)
- Despreciar las condiciones atmosféricas.
- Suponer que la superficie objeto es un reflector lambertiano.

La ecuación general planteada es válida para un número de procesos imagen; solo hace falta incluir una función apropiada imagen.

Por ejemplo, para medida de distancia con laser, el término D puede eliminarse debido a la gran cantidad de posiciones desconocidas y a pesar de la supuesta simplificación no es posible una solución del problema pixel a pixel.

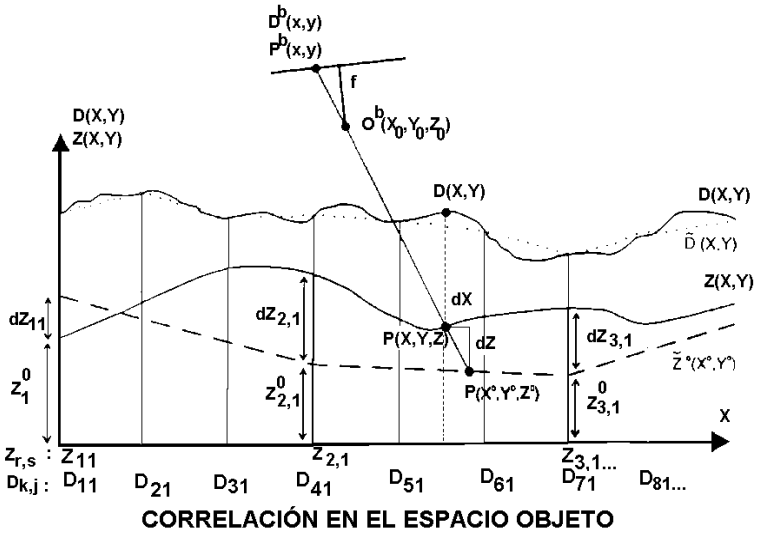


Figura 10. Espacio objeto y correlación.

El dilema se resuelve introduciendo una relación funcional cubriendo varios "surfel/groundel" denominados facetas. Tanto la superficie objeto Z(X,Y) y las densidades D(X,Y) son modeladas por facetas.

Las funciones analíticas usadas en este propósito Z(X,Y) y D(X,Y) que definen la superficie de una faceta, deberían permitir una aproximación a las verdaderas condiciones y seleccionarse libremente en principio. Si introducimos una estructura de malla regular, como ha sido probada con efectividad en modelos digitales del terreno, podemos usar la superficie parabólica hiperbólica (por ejemplo, es decir superficies de interpolación bilineal).

Para entender mejor el posible procedimiento, consideremos una foto simple (foto b de B fotos). Suponemos, sin limitarnos a la posible extensión del modelo matemático, que conocemos la orientación interna y externa de la imagen simple.

La geometría de la imagen viene definida por las ecuaciones de la perspectiva central. Después de introducir un modelo radiométrico (con brillo r_0 y contraste r_1) obtenemos la siguiente función imagen

$$\{D^b(x_i, y_i) + v_{D^b}(x_i, y_i)\}\ r_1^b + r_0^b = D(x_i, y_i)$$

El índice i indica que todos los elementos imagen en una faceta serán tenidos en cuenta.

Linealizando la última ecuación y considerando que

$$r_1^b = 1 + d(r_1^b)_3$$

La ecuación general nos queda:

$$(9)\quad D^b(x,y) + v_{D^b}(x,y) + D^b(x,y)\, d(r_1^b) = D(X,Y) \quad 4$$

La función densidad D(X,Y) en el espacio objeto es modelada por funciones de interpolación que son definidas para un valor k,1 $D(x_k,y_l)$. La función de densidad real D(X,Y) puede aproximarse por la correspondiente función de densidad :

$$(10)\quad D(X,Y) = \overline{D}(X,Y) = \sum \alpha_{k,l}(X,Y)\, D(X_k, Y_l) \quad 5$$

Aquí, α representa los pesos, con $\Sigma\alpha_{k,l}=1$ (tal interpolación con las correspondientes funciones de peso desarrolladas supone aplicar el método de los intervalos finitos)

Si el $D(X_k,Y_k)$ están definidas en una malla cuadrada, la interpolación bilineal es un método de interpolación satisfactorio. Las mismas consideraciones son válidas para la función de la altitud Z(X,Y), también descrita por una función de interpolación, obtendríamos

$$(11)\quad Z(X,Y) = \overline{Z}(X,Y) = \sum a_{rs}(X,Y) Z(X_r, Y_s) \quad 6$$

con pesos a que cumplen $\Sigma a_{r,s}=1$. Después de introducir la superficie de la faceta por su densidad y función de altitudes y apropiada linealización, obtenemos un sistema de ecuaciones de correlación para la foto b con $D(X_k,Y_k)$, $dZ(X_r,Y_s)$ r_0^b y $d(r_1^b)$ como incógnitas.

En una aplicación práctica, se eligen diferentes tamaños de facetas para D y Z, con un D significativamente más pequeño debido a su variación (alta frecuencia espacial). El tamaño de Z facetas es una integral múltiple de D facetas. En principio, el tamaño de faceta debería adaptarse a las condiciones que prevalecen. Además un grupo de facetas se ensamblan en una ventana, que se adapta a las condiciones locales. Su tamaño se aumenta cuando mínimas regiones se densidad constante (superficies de textura), ver figura de esta página.

Las incógnitas calculadas en este ajuste son los valores individuales de la función Z y la función D con la ventana en el espacio objeto y además las incógnitas del ajuste del tono de grises, que se suponen validas para la ventana entera.

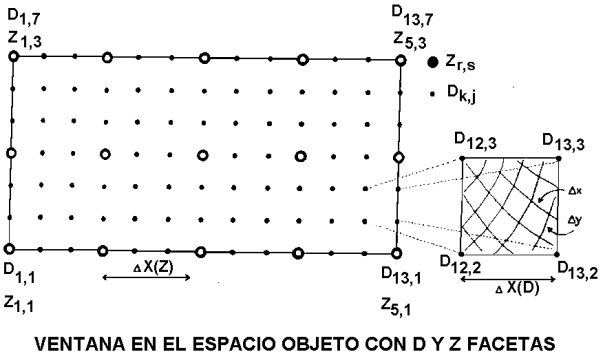


Figura 11. Facetas en el espacio objeto

El número de ecuaciones de corrección depende del número de pixels proyectados desde el fotograma en el espacio objeto y enmarcada en la ventana. El esfuerzo de cálculo es enorme, supongamos un fotograma (23x23 cm), digitalizado con un intervalo de 30 μm. El sistema de ecuaciones normales a resolver es del orden de 23000, aproximadamente, y cada una con 108 incógnitas. Con estas ecuaciones planteadas pretendemos resolver el problema fundamental de la fotogrametría digital, como es la determinación simultánea de la superficie objeto Z(X,Y) y su ortofotografía D(X,Y), con la condición de que son funciones continuas.

Teniendo en cuenta la relación:

$$D(x,y) = D'(x,y) \otimes PSF(x,y) \quad (12)$$

las funciones de interpolación planteadas, con características de transferencia espectral limitadas, pueden utilizarse para ambas funciones espaciales; y como ya hemos dicho nos lleva a trabajar con funciones locales en facetas, con los valores de una malla como parámetros (elementos finitos).

En tales funciones Z_{rs} y D_{kl} son los parámetros a determinar y, por simplificación de cálculos, los coeficientes o funciones de peso se consideran como interpolaciones bilineales.

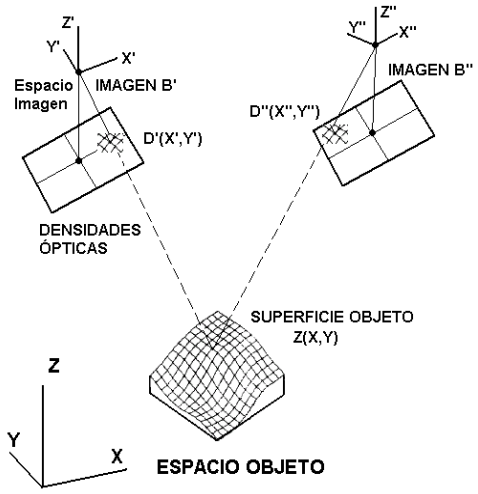


Figura 12. Correlación en el espacio objeto

La inversión imagen de la fotogrametría digital supone manejar densidades ópticas D(x,y) de un pixel en cualquier imagen B con su correspondiente función objeto $\overline{Z}(X,Y)_i$ y $\overline{D}(X,Y)_i$ consecuencia del desarrollo en serie de la condición

$$\{D^{b'}(x_i, y_i) + v_{D^{b'}}(x_i, y_i)\}\ r_1^{b'} + r_0^{b'} = \{D^{b''}(x_i, y_i) + v_{D^{b''}}(x_i, y_i)\}\ r_1^{b''} + r_0^{b''} = \ldots\ldots = D(X, Y) \quad (13)$$

siendo $D^{b'}$ y $D^{b''}$ las funciones de transferencia o transformación que son modeladas por una función lineal local, como se observa, y cada una correspondiente a una ventana de cálculo. Implícita está la aplicación de la solución jerárquica piramidal.

Las relaciones funcionales planteadas resuelven tanto el datum geométrico como el problema radiométrico en fotogrametría digital. Los puntos de control entrarían en la compensación para añadir y calcular información geométrica y radiométrica del objeto. Quedaría un último problema relativo a los grados de libertad como traslación y factor de escala, existiendo varias soluciones

Algunas cuestiones no se han discutido como la inclusión de la conexión de facetas en el ajuste, de forma que no se produzcan saltos. Estos saltos pueden existir en realidad, esto es real en la función de densidad. Para describir la función de densidad con un modelo de faceta paraboloide simplificado pueden no corresponder a la realidad, esto permite refinamientos. El proceso de *correlación* realizado no solo modela la superficie sino también simultáneamente la corrección radiométrica de la imagen. Por ejemplo el problema de la correspondencia radiométrica en mosaico de ortofotos es resuelto automáticamente en esta aproximación.

34.5. Correlación simbólica o relacional

Ya no se trata de comparar entidades. Ahora se trata de añadir ciertas relaciones entre entidades para mejorar la correlación. Hay que considerar tres aspectos.

34. 5.1. Descripción de las primitivas y las relaciones simbólicas

Tomemos un borde, extraemos sus atributos y ya tenemos la descripción de una entidad reducida a primitivas. Estos atributos pueden ser la longitud del segmento, la curvatura, la longitud, el centroide, el ángulo de entrada, firmeza, signo, información espectral, etc. Los atributos forman el vector de características. Mientras más rica sea la descripción, mas fácil será la correlación.

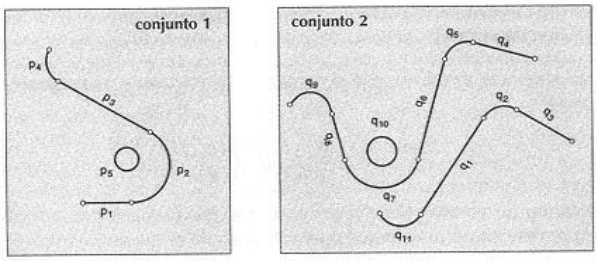


Figura 13. Correlación relacional

34. 5.2. Función de evaluación

Como ahora se trata de comparar descripciones y relaciones, se recurre a una función de evaluación que lógicamente evalúa la falta de semejanza entre dos primitivas.

Esta comparación de atributos mediante una función es problemática pues, entre atributos simbólicos, por ejemplo, entre los atributos color rojo y color negro, ¿cómo habrá que evaluar la falta de semejanza?, pues no se trata de comparar niveles de grises sino entidades simbólicas. Además, los atributos vienen en distintas unidades ya que hay píxeles, micras, radianes, etc. aunque se soluciona en parte normalizando los valores para que estén en el entorno [0 , 1] .
Otra función de evaluación consiste en el logaritmo negativo de la función de probabilidad condicional de manera que cuanto más próxima a la unidad, mas parecido entre las primitivas.

34. 5.3. Árbol de búsqueda

Ahora hay que seguir un esquema para correlar: es el árbol de búsqueda. Los árboles se forman con nodos relacionados por arcos. La mejor correlación será la que de el camino mas corto.
Para explicar el principio y mostrar como se consigue una correlación única imponiendo las relaciones adecuadas, lo mejor es poner un ejemplo. Se trata de correlar la entidad descompuesta en las primitivas p1, p2, p3, p4 y p5 con las entidades descompuestas en las primitivas q_i .

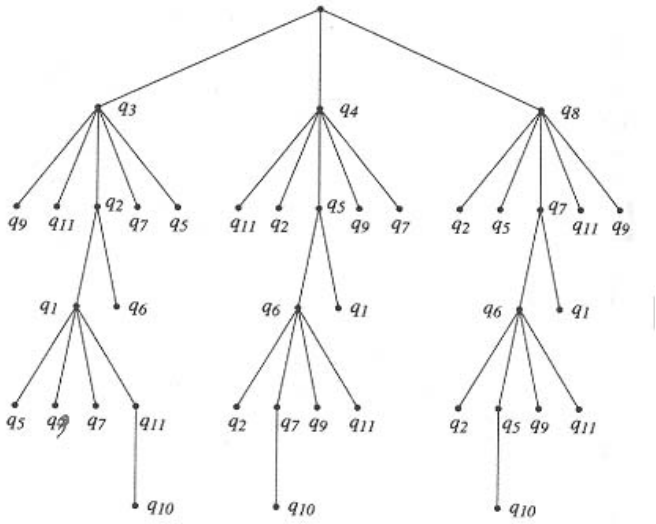


Figura 14. Árbol de búsqueda

P1 tiene atributos semejantes (segmento corto) a q3, q4 y q8 y a partir de ahí parten los tres árboles. Como p1 se relaciona con p2, (semicírculo a la izquierda) las posibles conexiones de q3, q4 y q8 son q9, q11, q2, q7 y q5.

La expansión de q3 es q2 , q4 por q5 y q8 con q7. p1 y p2 se relacionan con p3, (segmento largo) y de ahí que las posibles relaciones de q2, q5 y q7 sean q1 y q6 (segmento largo). De esta manera e van expandiendo los árboles hasta llegar a la última primitiva, q10.

Hay tres posibles caminos o soluciones: a: q3, q2, q1, q11, q10; b: q4, q5, q6, q7, q10 ; c: q8, q7, q6, q5, q10. La solución c se descarta por ser el camino mas largo (no en distancia, camino de mas costo) ya que sus atributos son los que mas se diferencian de los atributos de q_i. Se necesita información adicional para descartar una de las dos soluciones posibles restantes pues los costos son parecidos. Se toma la relación vecindad p5 con p1, p2, p3 y se ve que sólo puede asociarse con el camino q8, q7, q6, q5. Por tanto, la entidad p1, p2, p3, p4, p5 está relacionada con la entidad q8, q7, q6, q5, q10.

Bibliografía

[1] Digital Photogrammetry vol.1, de Toni Schenk,

[2] Photogrammetry, Volumen 1 y 2 de Karl Kraus

[3] Apuntes de Fotogrametría Digital de Francisco Papi.

Tema 35. Procesos de medida de coordenadas imagen en fotogrametría digital: Localización de marcas fiduciales (orientación interna). Orientaciones relativas y absolutas. Orientación externa. Soluciones a la aerotriangulación aérea digital. Control de calidad de los resultados de la aerotriangulación digital.

35.1. Procesos de medida de coordenadas imagen en fotogrametría digital: Localización de marcas fiduciales (Orientación Interna)

Con la orientación interna se calculan los parámetros de transformación para pasar las coordenadas sobre la imagen a un sistema tridimensional con origen en el centro de proyección de la cámara.

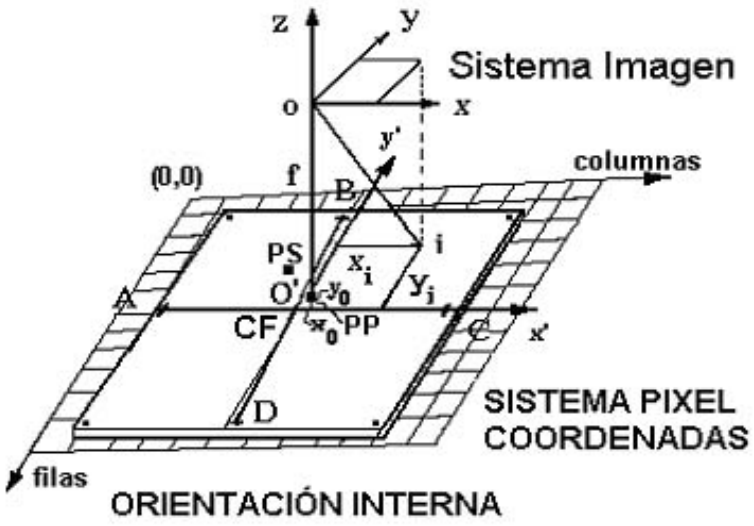


Figura 1. Orientación interna

Tenemos por lo tanto dos sistemas de coordenadas: el sistema imagen, tridimensional, y el sistema píxel, bidimensional.

Llamando : CF = centro fiducial, definido por las marcas fiduciales,

PP = punto principal,

PS = punto de mejor simetría, origen de la distorsión radial

xo, yo = coordenadas del punto principal respecto CF

f = distancia focal

xp, yp = coordenadas imagen de p

Col_p, Fil_p = coordenadas píxel (columna, fila) de p .

Estos valores son conocidos por el certificado de calibración. El plano xy imagen y el sistema píxel son paralelos, el eje x coincide con la dirección del vuelo, las coordenadas de un punto p en el sistema imagen son (xp, yp, -f), la coordenada f es negativa para imágenes escaneadas positivas y f es positiva cuando se escanean negativos.

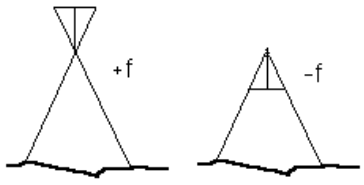


Figura 2. Valores de la coordenada f

En el caso de imágenes tomadas con cámara digital, la transformación del sistema píxel (columna, fila) al sistema imagen (xp, yp, zp) es la siguiente:

(1)
$$xp = (Col_p - Col_o)\, res_Col$$
$$yp = (Fil_p - Fil_o)\, res_Fil$$
$$zp = (-f)$$

Siendo res_Col, res_Fil la resolución o tamaño del píxel en micras.

En la práctica, las cosas no son tan sencillas pues hay que realizar una transformación afín entre las coordenadas píxel de las marcas fiduciales y las coordenadas imagen de las mismas marcas fiduciales según el certificado de calibración de la cámara:

(2)
$$\begin{bmatrix} xp_fid \\ yp_fid \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a11 & a12 & a13 \\ a21 & a22 & a23 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Col_p \\ Fil_p \end{bmatrix}$$

Esta ha sido la primera parte de la transformación: pasar de coordenadas píxel a coordenadas referidas al centro fiducial (coordenadas fiduciales). La segunda parte es pasar del sistema fiducial al sistema imagen:

(3)
$$xp = x_fid - xo$$
$$yp = y_fid - yo$$
$$zp = -f$$

Las coordenadas imagen deben ser refinadas pues hay diversos factores que deforman la imagen final de los objetos, por lo que deben ser corregidas.

Las correcciones se aplican en orden inverso al orden en que se producen las deformaciones correspondientes y el orden en el que se producen esas deformaciones es:

1º Desplazamiento de los objetos hacia el centro de la imagen debido a la curvatura terrestre.

2º Desplazamiento hacia fuera de la imagen debido a la curvatura del rayo óptico en la trayectoria del objeto terreno a la cámara.

3º Distorsión producida al atravesar el rayo óptico el objetivo. Esta distorsión se conoce por el certificado de calibración y se corrige por un polinomio de potencias impares.

4º Sólo para cámaras analógicas. La película tiene deformaciones debidas al los procesos del revelado y al almacenamiento. Se modelan con una transformación afín.

5º Sólo para cámaras analógicas. El proceso de escaneado introduce errores de geometría. Se modela con una transformación afín. Esta transformación afín y la anterior se engloban en una única afín.

35.1.1. Orientación interna interactiva

Es la que se hace en los restituidores analíticos y digitales. En el primer caso, el mismo sistema mueve los portaplacas hasta situar aproximadamente la primera marca fiducial bajo el índice de medida. Es el operador humano el que hace la coincidencia exacta entre la marca y el índice. En el segundo caso no hay movimiento mecánico de los portaplacas pero sí virtual. De la misma forma se miden las demás marcas fiduciales. Después de haber medido más de tres marcas hay redundancia para el cálculo de los parámetros de la transformación afín entre las coordenadas medidas y las coordenadas del certificado de calibración. Si algún residuo está fuera de tolerancia (fijada a priori) habrá que repetir la lectura. Si los residuos están dentro de la tolerancia se acepta la transformación y se pasa a la siguiente orientación: relativa y absoluta en los restituidores analíticos y orientación exterior en los restituidores digitales. Antes de realizar todas estas operaciones ha habido que configurar un nuevo proyecto y haber introducido los datos del certificado de calibración.

35.1.2. Orientación interna automática y autónoma

En la OI automática se reduce al mínimo el factor humano, pero todavía es interactiva. En la OI autónoma el sistema realiza el 100% del trabajo y no hay posibilidad de interactuar por lo que el sistema debe ser infalible porque lo que se pretende es establecer una cadena de trabajo automática que incluya los distintos procesos fotogramétricos:

O I $\rightarrow$ Ori. Relativa $\rightarrow$ Aerotriangulación $\rightarrow$ MDT por correlación $\rightarrow$ Ortofotos $\rightarrow$ Mosaico

O esta otra:

O I $\rightarrow$ Ori. relativa $\rightarrow$ Orientación Absoluta $\rightarrow$ Imagen normalizada

El objetivo de la O I autónoma es identificar cada marca fiducial y medir sus coordenadas con precisión superior al píxel (en el rango subpíxel) y de una forma robusta. El sistema tiene que ser capaz de dar respuesta a los distintos problemas que pueden presentarse, como imágenes en positivo o negativo, color o grises, exposición deficiente, resolución grosera, rayas, arañazos.

Los datos de los que se parte son las imágenes digitales, el certificado de calibración, identificadores para cada marca fiducial, una imagen ideal o plantilla de la marca fiducial, o una descripción estructural de ésta si se utilizan métodos de correlación simbólica.
Para localizar las marcas y medirlas hay distintos métodos:

- **Métodos basados en áreas**

Aprovechando que el modelo radiométrico de una marca fiducial es una marca clara sobre un fondo oscuro, mediante una umbralización del histograma puede obtenerse una imagen binaria con negro para la señal y blanco para el fondo. Cuando la imagen original no es nítida, es decir, hay muchos grises intermedios entre el negro de la marca y el blanco del fondo se obtienen distintas imágenes binarias dependiendo del valor de umbral tomado. ¿Y como se toma el valor de umbral apropiado? El método de Otsu (1971) consiste en minimizar la suma ponderada de las varianzas de cada uno de los dos grupos de píxeles, es decir, cada valor de umbral da una distribución de píxeles blancos y otra distribución de píxeles negros con sus medias y varianzas.

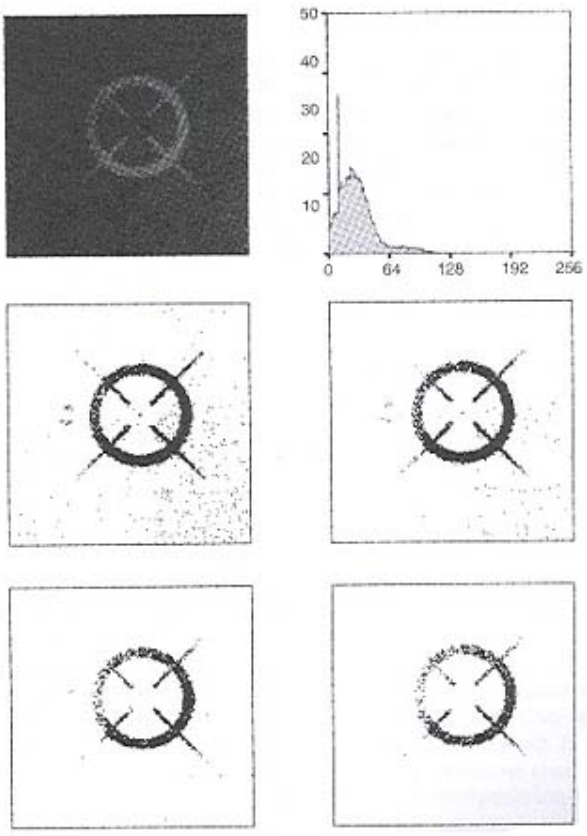


Figura 3. Umbralización de marcas fiduciales

El umbral t más apropiado para binarizar la imagen es el de mínima suma de todas las combinaciones posibles de varianzas ponderadas de los grupos blancos y negros:

$$\sigma^2 w(t) = s_b(t).\sigma_b^2(t) + s_n(t).\sigma_n^2(t) \quad (4)$$

El peso es la suma de frecuencias relativas en el histograma de cada grupo.

Ya está identificada la marca fiducial, ahora hay que medir sus coordenadas en el rango subpíxel para obtener una precisión comparable a la de la fotogrametría analítica. Sin embargo este proceso no está exento de problemas pues la forma, el tamaño y la posición de la marca binarizada varían según el umbral y el muestreo tomados tal como se ve en la figura de la izquierda.

Suponiendo que la marca fiducial es cuadrada y mide 60 x 60 micras y los píxeles son de 20 micras, con 9 píxeles, en teoría, se cubriría la marca pero no es así pues los bordes de la marca no tienen por qué coincidir con los bordes de los píxeles y habrá píxeles que cubran un 100% de la marca y otros que cubran menos. En el ejemplo, se asigna el valor 10 a los píxeles cubiertos totalmente por la marca. El píxel inferior izquierdo es el que menos energía recibe, sólo un 8% del total y así, a cada píxel le corresponde una etiqueta que es el valor del área ocupada.

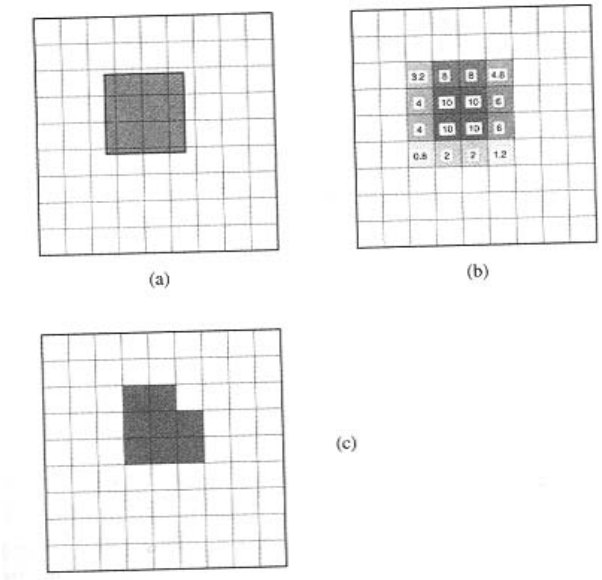


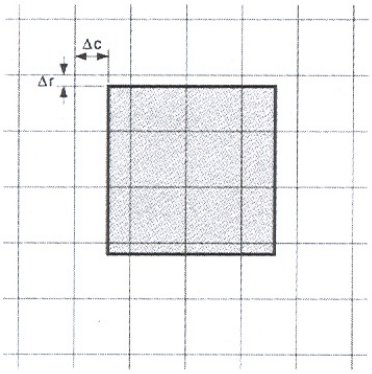
Figura 4. Distintos resultados de umbralizar en el rango subpíxel

Al tomar un umbral de 5 se ve como la marca cambia de forma, tamaño y posición y si se toman como coordenadas de la marca fiducial las del centroide se tiene sólo una aproximación, que podría ser otra si se tomara otro umbral. La otra solución se basa en la correlación cruzada y el factor de correlación que se estudiaron en el tema anterior. Para ello hay que disponer de

una imagen ideal de la marca fiducial, que es la plantilla, para correlacionarla con la imagen umbralizada. Después hay que ajustar una curva cuadrática a los factores de correlación obtenidos para cada posición y derivando se obtiene la x,y del máximo:

$$v_i = ax_i^2 + by_i^2 + cx_i y_i + dx_i + ey_i + f + \rho_i \quad \text{se ajusta por mínimos cuadrados}$$

(5) y resolviendo el sistema: $\left.\begin{matrix} 2ax + cy + d = 0 \\ 2by + cx + e = 0 \end{matrix}\right\}$ se obtienen x,y del máximo.



Otra opción consiste en dejar los niveles de gris como están, sin umbralizar, y correlacionar la plantilla ideal no con la imagen real sino con distintos remuestreos de la imagen real. Esos remuestreos vienen de variar la resolución en un incremento inferior a un píxel (ej. Un quinto de píxel). En cada remuestreo, el nivel de gris es proporcional a la superficie cubierta por la plantilla.

Figura 5. Desplazamiento de la matriz por incrementos subpíxel

- **Solución basada en características**

Una marca fiducial se puede descomponer en primitivas, círculos y segmentos, y ser descrita en términos geométricos. Mediante relaciones entre primitivas pueden describirse los elementos que forman una marca fiducial: cruces, círculos concéntricos. A partir de estas estructuras se puede seguir alguna estrategia de detección y localización de marcas fiduciales:

1º detección de los píxeles de borde

2º agrupación de los píxeles de borde para formar primitivas

3º comprobación de las relaciones entre primitivas y estructuras superiores

4º cálculo del centro de la marca fiducial.

Para localizar círculos y líneas estructurales de la marca fiducial se recurre a la transformada de Hough: si en el dominio espacial la abcisa es la coordenada *x,* y la ordenada es la coordenada *y,* en el dominio paramétrico la abcisa es la pendiente y la ordenada es la a ordenada en el origen. De esta forma, la recta y = ax + b se convierte en el dominio paramétrico en el punto (a,b). Un punto en el dominio espacial (xi, yi) se convierte en una recta al pasarlo al dominio paramétrico: b = -xi a + yi, con xi, yi constantes. –xi es la pendiente de la recta, yi es la ordenada en el origen. De esta forma, cada píxel de una recta en la imagen produce una recta en el dominio

paramétrico y el punto paramétrico donde se cortan esas rectas se transforma en una recta en el dominio espacial. Con los círculos hay un juego parecido: un círculo en el dominio espacial viene dado por $(x-xc)^2 + (y-yc)^2 = r^2$, con x,y variables, xc, yc coordenadas del centro, r=radio.

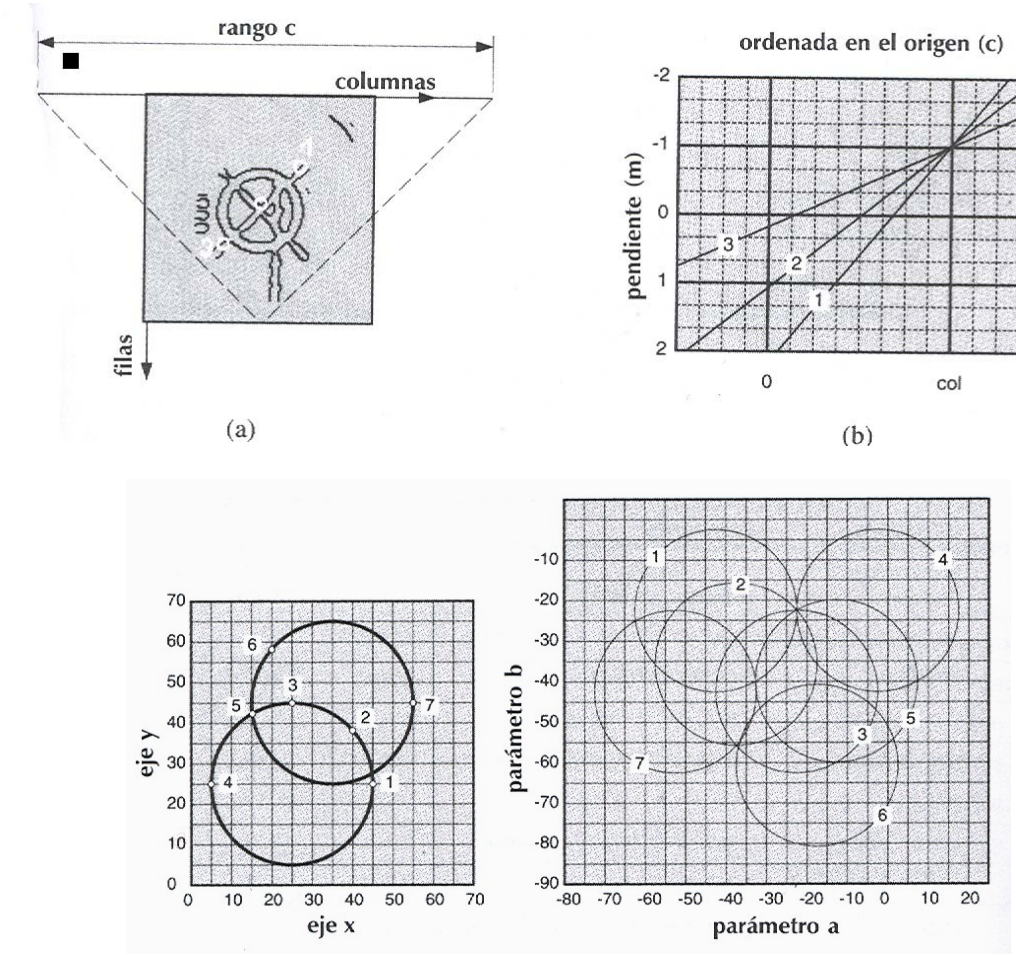


Figura 6. Aplicación de la transformada de Hough

Un punto de ese círculo en el dominio espacial produce un círculo en el dominio paramétrico: $(xc-xi)^2 + (yc-yi)^2 = r^2$, siendo xi,yi el centro, xc, yc las variables. Cada píxel del círculo en la imagen se transforma en un círculo en el dominio paramétrico (igual radio y centro el punto) y el punto de corte de varios de esos círculos traducido al dominio espacial es el círculo de igual radio y centro el punto de corte anterior, que es el centro de la marca fiducial buscada.

Con estos procedimientos se determinan los círculos y rectas que forman la marca fiducial, sin embargo, para localizar las coordenadas del centro con precisión se recurre a los mínimos cuadrados. Cada píxel del círculo da una ecuación: $(xi-xc)^2 + (yi-yc)^2 = R^2 + Vi$

Se deben conocer de antemano las dimensiones de los elementos que forman la marca fiducial. Como la marca fiducial tiene también un segundo círculo exterior, hay una 2ª ecuación :
$(xj-xc)^2 + (yj-yc)^2 = R^2ext + Vj$ Las incógnitas son xc,yc, centro del círculo buscado. Las ecuaciones hay que linealizarlas:

$$-2(x_i - x_c)dx_c - 2(y_i - y_c)dy_c + \left[(x_i - x_c)^2 + (y_y - y_c)^2\right] - R^2_{\text{int}} = V_i \quad (6)$$

$$-2(x_j - x_c)dx_c - 2(y_j - y_c)dy_c + \left[(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2\right] - R^2_{ext} = V_j \quad (7)$$

Las líneas que forman la cruz de la marca fiducial también pueden incluirse en el ajuste: la recta que pasa por el centro y el punto n, con pendiente m es: $(y - y_c) = m_1(x - x_c)$

y de ahí: $(y - y_c) - m_1(x - x_c) = V$

la otra recta que forma la cruz es: $(y - y_c) - m_2(x - x_c) = V$

y linealizando ambas ecuaciones, suponiendo desconocidos el centro y las pendientes, queda:

$$-dy_c - m_1 dx_c - m_1 x dm_1 + \left[y - y_o - m_1(x - x_o)\right] = V \quad (8)$$

$$-dy_c - m_2 dx_c - m_2 x dm_2 + \left[y - y_o - m_2(x - x_o)\right] = V \quad (9)$$

Se necesitan valores aproximados para x_c, y_c, m_1, m_2. Las ecuaciones 6,7, 8, y 9 forman el modelo matemático del que se obtienen la correcciones a los valores aproximados.

Resumen

Los procedimientos vistos se aplican a las imágenes escaneadas. Cada imagen tendrá una orientación interna distinta pues cada imagen se coloca en el portaplacas de manera distinta y las coordenadas imagen varían de una imagen a otra. En las imágenes obtenidas con cámara digital la orientación interna es siempre la misma e igual para todos los fotogramas pues todos ellos tienen los mismos ejes de coordenadas, los cuales son paralelos a las líneas y columnas de los píxeles. Por no haber marcas fiduciales, la O I se reduce a la traslación 35.1 vista al principio del tema.

35.2. Orientaciones relativas y absolutas

35.2.1. Introducción

En la cadena de producción automatizada, el proceso de la orientación relativa toma por pares los fotogramas que han pasado por la orientación interna y forma los modelos estereoscópicos, los cuales los cuales serán orientados posteriormente con la orientación absoluta para que las coordenadas medidas en los modelos sean coordenadas terreno.

35. 2.2 OR analítica versus OR automática

Tradicionalmente, es el propio operador humano el que hace una buena selección de puntos para medirlos estereoscopicamente, obteniendo una precisión de 4 ó 5 micras, mientras que el operador automático, hace una selección aleatoria de detalles o características, pero no puntos, y mide coordenadas por cualquier método de correlación. Es menos preciso, por ejemplo, si el tamaño de píxel es de 15 micras, la precisión en la correlación puede estar en unos tres píxeles, o sea, 45 micras. La buena noticia es que el operador automático correla muchos detalles y para 100 correlaciones la precisión es: $\frac{45}{\sqrt{n}} = \frac{45}{\sqrt{100}} = 4.5$ micras, comparable a la precisión obtenida por el método clásico. La peor calidad de la medición automática se compensa con la mayor redundancia.

35. 2.3 El modelo matemático

A partir de las ecuaciones de colinealidad entre el centro de proyección, el punto imagen y el punto objeto se deduce que se necesitan 12 parámetros para fijar un modelo estereoscópico en el espacio, que son las tres coordenadas del centro de proyección izquierdo, y los tres giros, las tres coordenadas del centro de proyección derecho y sus tres giros. Esto es lo que se llama orientación exterior OE. La OE de un modelo estereoscópico puede descomponerse en dos partes, OR para formar el modelo y OA para colocarlo en el espacio en la situación correcta. Para situar un sólido (el modelo estereoscópico) en el espacio se necesita una escala, tres giros y tres traslaciones pues se trata de una transformación de semejanza en el espacio. Por tanto, para la OR quedan 5 parámetros y puede resolverse por colinealidad y por coplanaridad.

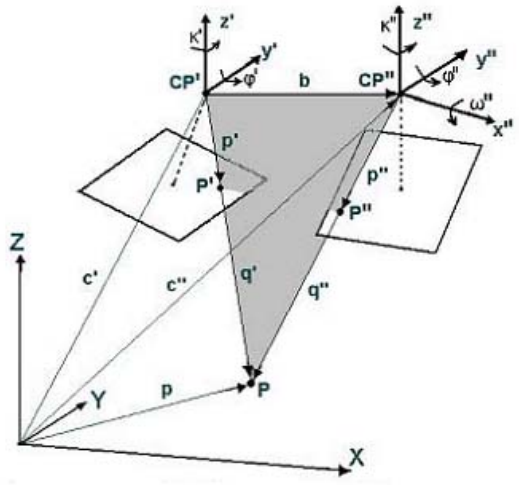


Figura 7. Modelo matemático en el espacio

A) Por colinealidad. Usando la notación vectorial, se tiene: $\vec{P} = \vec{C}' + \lambda' R' \vec{p}'$ siendo λ' la escala y R' la matriz de rotación. De ahí: $\vec{p}' = \lambda^{-1} R'^{T} (\vec{P} - \vec{C}')$

Como el vector imagen tiene tres componentes, $(x_p - x_o), (y_p - y_o), (-f)$ se obtienen tres ecuaciones y dividiendo la primera entre la segunda y la primera entre la tercera se obtienen las conocidas relaciones de colinealidad.

La colinealidad establece una relación de semejanza entre el espacio objeto y el espacio imagen con 7 parámetros, escala, tres giros y tres traslaciones. Como el modelo estereoscópico se fija en el espacio con 12 parámetros, fijando 7 de ellos quedan 5 libres para la orientación relativa. De todas las combinaciones posibles de 12 parámetros tomados de 5 en 5 hay dos que se han utilizado tradicionalmente:

Haciendo: $X_o' = 0,\ Y_o' = 0,\ Z_o' = 0,\ X_o'' = b_x,\ Y_o'' = 0,\ Z_o' = 0,\ \omega' = 0$, quedarían como parámetros libres o incógnitas: $\varphi', \kappa', \varphi'', \kappa'', \omega''$. Es el método de los giros.

Haciendo: $X_o' = 0,\ Y_o' = 0,\ Z_o' = 0,\ X_o'' = b_x,\ w' = 0,\ \varphi' = 0,\ \kappa' = 0$ quedarían libres los parámetros del fotograma derecho: $Y_o'' = b_y,\ Z_o'' = b_z,\ \omega' = 0,\ \varphi' = 0,\ \kappa' = 0$ .Es el método de un solo proyector.

Planteando las ecuaciones de colinealidad después de haber fijado los parámetros anteriores, tenemos cuatro ecuaciones por cada punto $(x_p',\ y_p',\ x_p'',\ y_p'')$ y 5 + 3n incógnitas (tres coordenadas terreno por cada punto Xp, Yp, Zp). Con cinco puntos tenemos 20 ecuaciones con 20 incógnitas y habrá que leer más puntos para tener redundancia.

La ventaja del modelo de colinealidad es que analizando la estructura del sistema de ecuaciones, se pueden independizar el cálculo de los cinco parámetros del cálculo de las coordenadas terreno por lo que se pueden medir muchos puntos sin incrementar el coste del cálculo.

B) Por coplanaridad. La relación de colinealidad izquierda tiene que dar el mismo resultado que la relación de colinealidad derecha pues el punto terreno es el mismo. Así se tiene:

$$\vec{P} = \vec{C} + \lambda' R' \vec{p}' = \vec{C}'' + \lambda'' R'' \vec{p}''$$

Haciendo el cambio: $\vec{q}' = R' \vec{p}'$ y $\vec{q}'' = R'' \vec{p}''$, lo cual equivale a rotar los vectores imagen, queda: $\vec{C}' + \lambda' \vec{q}' - \vec{C}'' - \lambda'' \vec{q}'' = 0$, pero $\vec{C}'' - \vec{C}'$ es el vector base, $\vec{b}$ y quedaría: $\lambda' \vec{q}' - \lambda'' \vec{q}'' = \vec{b}$ y multipicando ambos términos por el producto vectorial $\vec{q}' \wedge \vec{q}''$,se obtiene la condición de coplanaridad:

$0 = \vec{b}(\vec{q}' \wedge \vec{q}'')$ que significa que la base y los dos vectores están en el mismo plano y ese plano es, precisamente, el plano epipolar por contener a la base.

Linealizando la ecuación anterior se llega a la ecuación de paralaje:

$$Py = -x'd\kappa' + x''d\kappa'' + \frac{x'y'}{f}d\varphi' - \frac{x''y''}{f}d\varphi'' + (f + \frac{y''y''}{f})d\omega'' \quad (10)$$

con Py = y'' – y', que es el observable, x'y', x'' y'' fotocoordenadas del punto homólogo y f, la distancia focal.

En un ajuste por mínimos cuadrados las ecuaciones de observación serían de la forma:

$$-x'd\kappa' + x''d\kappa'' + \frac{x'y'}{f}d\varphi' - \frac{x''y''}{f}d\varphi'' + (f + \frac{y''y''}{f})d\omega'' - Py = V \quad (11)$$

En la OR interactiva es el operador humano quien selecciona mas de cinco puntos para eliminar en ellos el paralaje *y* después el sistema calcula los parámetros de la orientación y si los residuos obtenidos están dentro de la tolerancia, se acepta la orientación y el sistema pasa a modo modelo. Ahora el operador humano tendrá que posicionarse en más de tres puntos de coordenadas terreno conocidas para establecer la orientación absoluta.

En un sistema analítico los portaplacas se mueven hasta llevarlas zonas von Grubber al índice de medir y el operador humano es el que hace el posado.

En el sistema digital también se posicionan la imagen y el índice en las zonas von Grubber pero dependiendo del grado de automatización, el posado del índice en los puntos homólogos lo hace el operador humano o lo hace el mismo sistema mediante algún sistema de correlación. También, dependiendo del grado de automatización del sistema, el resultado de la correlación del punto homólogo se acepta o rechaza interactivamente o automaticamente.

35. 2.4 Orientación relativa automática

Los sistemas automáticos utilizan los operadores de interés para localizar e identificar zonas de alta varianza y a partir de ahí seleccionar puntos de interés. Después, cada punto de interés de un fotograma se correla con los candidatos a punto homólogo en todos los fotogramas que tienen recubrimiento común. Se utiliza también la estructura de imágenes piramidales para extraer puntos de interés. Se plantea la correlación sólo en puntos que en el inferior han sido aceptados como candidatos. Se ha comprobado que en las proximidades de un punto de interés aparecen mas puntos de interés al subir un nivel por lo que se va incrementando el número de

puntos. Se empieza con cientos de puntos y se termina con miles de puntos para correlar por lo que estos métodos de obtener los parámetros de orientación son sencillos y efectivos.

Como el punto débil de la orientación automática es la identificación y localización de pares de puntos homólogos, se han desarrollado algoritmos que obtienen los puntos homólogos sin correlar. Son métodos de prueba y ensayo. Se trata de localizar puntos de interés en el fotograma izquierdo, puntos de interés en el fotograma derecho y sin correlarlos, plantear un sistema de ecuaciones con todas las combinaciones posibles de pares de puntos, tomados de 5 en 5. se calculan muchos conjuntos de cinco parámetros con los que se obtiene una curva de probabilidad de combinaciones. Los parámetros buscados son la combinación de frecuencia mas alta. Como una media de 1000 puntos por imagen da $5.7\ 10^{15}$ combinaciones de cinco pares de puntos, se ha desarrollado una solución que limita la explosión de combinaciones. Consiste en que en cada una de las zonas de von Grubber la paralaje *y* sólo está relacionada con uno sólo de los cinco parámetros según puede verse en la ecuación de paralaje 35.10. Por ejemplo, el paralaje en la zona 1 se elimina con κ_2 y el paralaje en la zona 2 se anula con κ_1 sin que estropee lo anterior. En la zona 3 se elimina el paralaje con φ_2 y tampoco introduce paralajes en las zonas 1 y 2. Lo mismo con φ_1 en la zona 4. De esta forma, las ecuaciones de observación tienen sólo una incógnita en lugar de cinco. Al llegar a la zona 5, ya se conocen cuatro parámetros y sigue habiendo sólo una incógnita. Los picos de la distribución darían los valores de los parámetros buscados.

35.3. Orientación externa OE, orientación absoluta OA.-

Después de establecer la orientación relativa sólo queda relacionar el espacio modelo con el espacio objeto.

Se habla de orientación absoluta para referirse al modelo estereoscópico, se habla de orientación exterior para referirse a los fotogramas individuales y se habla de aerotriangulación cuando se trata de pasadas y bloques. Por estas tres vías se relaciona la imagen con el terreno.

Por los tres caminos se necesita información adicional: los puntos de apoyo tomados en campo con coordenadas terreno y coordenadas en el espacio imagen.

En fotogrametría analítica y digital cuando no está automatizada al 100%, es fácil introducir los puntos de campo. El operador humano con la ayuda de las reseñas de campo los localiza y mide en el sistema imagen pero en los procesos automáticos, no es tan fácil encontrar e introducir los puntos de campo. Hasta ahora se han desarrollado distintas soluciones para identificar automáticamente los puntos de apoyo:

a) por puntos preseñalizados en campo. Presenta el problema de que hay que generar una imagen de la señal (o varias para tener distintas orientaciones) para correlar después tal como se hacía con las marcas fiduciales.

b) Buscando en un SIG cruces de carreteras, se convierten a descripciones relacionales para iniciar posteriormente un proceso de correlación simbólica o relacional con árboles de búsqueda.

c) Por prueba y error. Se extraen por un lado los bordes o características de los puntos de control y por otro lado se tienen todos los bordes extraídos en las imágenes. La cuestión es como encontrar los bordes homólogos de los bordes de puntos de control de entre todas las parejas posibles. Hay que plantear todas las ecuaciones de colinealidad posibles y aquellos parámetros que tengan la frecuencia mas alta son los parámetros de orientación buscados.

d) Utilización de superficie de control. Ya no se utilizan puntos de control ni características sino superficies de control o apoyo para obtener la orientación absoluta cuando está resuelta la orientación relativa. Se plantea una transformación desconocida entre los puntos del modelo y puntos en el espacio objeto obtenidos por interpolación de un MDT. El modelo matemático se basa en minimizar las distancias entre la superficie modelo y la superficie de control.

e) Georreferenciación directa. Volando con un avión equipado con sistemas GPS, INS combinados y las estaciones de referencia necesarias, pueden obtenerse a partir de los datos de vuelo los 6 parámetros de orientación de cada fotograma después de interpolar los tiempos de toma de cada fotograma en la trayectoria del avión.

Las orientaciones exteriores se introducen mediante un fichero en la estación fotogramétrica digital y si ya se ha realizado la OI interactivamente o automáticamente, se está en disposición de poder restituir los modelos estereoscópicos.

En la orientación indirecta se parte de los puntos de control conocidos para calcular los parámetros de orientación. Se plantea la cuestión de cual de los dos métodos es mas preciso.

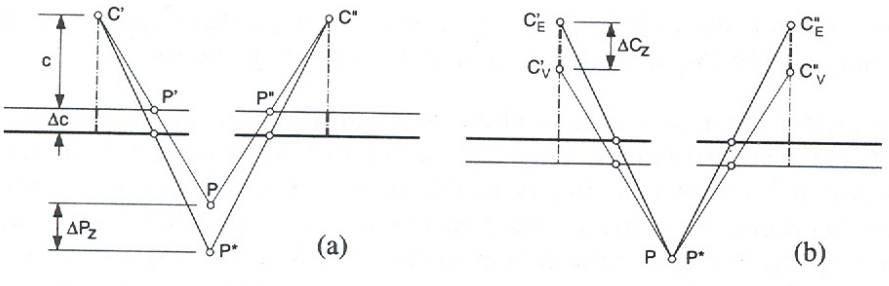


Figura 8. Izquierda: Influencia de un error en los parámetros de orientación, se crea paralaje. Derecha: influencia de un error en las coordenadas del punto de apoyo, es absorbido por los parámetros de OE.

Un error residual como la diferencia entre la focal del certificado de calibración, en la georreferenciaación directa se traduce en un error en la coordenada z del punto terreno restituido igual al error en la focal multiplicado por la escala pues la orientación exterior es fija. En la georreferenciación indirecta se parte de puntos fijos y los errores residuales repercuten en la posición del centro de proyección por lo que la restitución es correcta aunque la orientación exterior pueda tener error.

35.4. Soluciones a la aerotriangulación aérea digital

Ya se dijo que cuando se trata de un bloque la orientación exterior se obtiene de la aerotriangulación. En ese caso la OE sustituye en el flujo de trabajo a la OR y OA.

Las fases de que consta un proceso de aerotriangulación digital son las siguientes:

a) generación de imágenes piramidales. A partir de los ficheros originales con las imágenes digitales se crea la estructura de imágenes piramidales que será un proceso totalmente automático.
b) preparación del bloque. El segundo paso es la configuración del proyecto. Hay que definir unas localizaciones aproximadas de las pasadas, parámetros y características de la cámara, resolución de las imágenes y coordenadas de los puntos de apoyo.
c) orientación interior. El nivel de automatización varía de unos sistemas a otros. Un sistema debe tener implementados la OI manual, semiautomática y automática al 100%. En modo normal es el operador quien busca las marcas fiduciales para medir sus coordenadas. En modo interactivo sólo tiene que aceptar o rechazar las mediciones según los residuos obtenidos y en modo automático el operador humano no hace nada. Si las imágenes se tomaron con cámara digital todas las orientaciones internas son iguales.
d) generación automática de puntos. Es la tarea que mas tiempo consume en los métodos tradicionales. Hay sistemas semimanuales en los que el operador humano tiene que localizar los puntos de paso en un fotograma y colindantes aproximándose con los índices a los puntos homólogos. El sistema termina de correlar el par de puntos. Y hay sistemas autónomos capaces de correlar en todos los fotogramas miles de puntos, dependiendo de la estrategia de búsqueda que se defina en el proyecto. Si la algorítmica es buena el sistema permitirá remedir posteriormente puntos mal correlados. Esta remedición es inevitable pues suelen aparecer puntos correlados en nubes, lagos, árboles e incluso correlados con puntos que no son el homólogo.
e) Medida de los puntos de control. Tiene que ser interactiva, en modo mono o estéreo, y en sistemas muy sofisticados puede ser automática en el caso de puntos preseñalizados. El operador humano busca y aproxima la pareja de puntos homólogos y el sistema

termina de correlar. Actualmente se necesitan muy pocos puntos de control en un bloque por lo que no es necesario que esta tarea este automatizada al 100%.

f) Ajuste del bloque. Después de identificar y localizar los puntos de paso y de control, el sistema almacena en un fichero las fotocoordenadas de los puntos. Con ellos y las coordenadas terreno resuelve la aerotriangulación por el método de haces dando como resultado las coordenadas terreno de los puntos de paso, y también las coordenadas calculadas de los puntos de control que sirven para hacer el control de calidad por comparación con las coordenadas medidas en campo y finalmente también se obtienen los 6 parámetros de orientación exterior de cada fotograma.

   Dependiendo del sistema, habrá una salida gráfica con las elipses de error en los puntos calculados y unas matrices de varianza covarianza para analizar los resultados. Los sistemas mas modernos incluyen la matriz de cofactores de los residuos para estudiar la fiabilidad del ajuste.

A continuación se da una comparativa por fases de la aerotriangulación según el nivel de automatismo:

	AT analítica	AT digital interactiva	AT digital automática
Digitalización	I/A	I/A	A
Configuración del bloque	M / A	M / I	A
Orientación interna	M	M / I	A
Selección puntos paso	M	M	A
Transferencia	M	I	I / A
Medición	M	I	I / A
Entrada puntos control	M	M / I	M / I
Ajuste del bloque	A	A	A

Siendo: AT = aerotriangulación, A = automática, I = interactiva, M = manual

35.4.1. Resumen de características en sistemas actuales de aerotriangulación

	Hats	Mach AT Intergraph	Mach AT Inpho	Phodis AT
Orientación Interior	automático	semi aut.	semi aut.	automático
MDT integrado	si	si	si	No
GPS integrado	valores iniciales	si	si	valores iniciales
Medición automática	si	si	si	Si
Algoritmo	Correlac. Cruzada	ABM, FBM	ABM FBM	ABM FBM
Medida de puntos interactiva	estéreo	estéreo	mono	Mono
Ajuste por haces	módulo	integrado	integrado	externo

La tendencia actual es la integración del ajuste del bloque por haces con un módulo de transferencia automática de puntos. La automatización tiene que incluir un control de calidad automático para obtener una alta fiabilidad y eficiencia. Como la medida directa de los parámetros de OE a partir del GPS/INS se está imponiendo en los vuelos actuales, la combinación de la aerotriangulación digital con estos parámetros es la mejor solución por razones de precisión, fiabilidad y control de calidad.

Las líneas en las que pueden mejorar los paquetes actuales de aerotriangulación digital para aumentar la rapidez, precisión, robustez, flexibilidad, facilidad del entorno se pueden resumir en:

- una interfaz gráfica de usuario que disponga de un chequeo de los valores iniciales de la orientación de las imágenes, pues la calidad de la medición automática de puntos depende de la calidad de los valores iniciales de orientación.

- Uso de un Modelo Digital de Elevaciones ya que aumenta la rapidez y precisión de la medida automática de puntos, sobre todo en zonas montañosas.

- Implementar una técnica de correlación que sea combinación de la correlación por bordes, FBM, para medir toscamente en los niveles piramidales bajos con la correlación por mínimos cuadrados para medir con mucha precisión.

- Uso de datos GPS, parámetros adicionales y un algoritmo mas eficiente para la formación del sistema de ecuaciones normales.

- Control de calidad durante el cálculo para los puntos medidos,. Evita errores groseros.

- Integración del ajuste por haces con la medición de puntos para la eliminación de errores groseros.

Algunos aspectos a tener en cuenta para mejorar el algoritmo de cálculo son los siguientes: la calidad de los resultados y la eficiencia de la aerotriangulación dependen de la transferencia automática de puntos y del algoritmo de correlación. A su vez, estos factores dependen de la calidad de la imagen, incluyendo las condiciones del escaneado (vuelo no digital) y de las condiciones de la toma además de las características del terreno (ej. Grandes o pequeñas pendientes). En suma, se ha comprobado que dan problemas en la correlación los siguientes aspectos:

- extremas diferencias de altura, zonas montañosas
- pasadas con diferentes fechas de vuelo (la vegetación cambia)
- sombras cuando el sol está bajo
- zonas de bosque y lagos
- distintas escalas de vuelo en el bloque

35.5. Control de calidad de los resultados de la aerotriangulación digital

Los resultados obtenidos del cálculo de un proyecto de aerotriangulación, como los de cualquier otro proyecto, tienen que superar el proceso de control de calidad antes de ser validados.

El control de calidad geométrico del ajuste del bloque es dado por el resultado del ajuste por haces (RMS, σ, etc) y además, debido a la alta automatización en las medición de las coordenadas y la necesidad de eliminar los errores groseros, es esencial chequear las conexiones entre fotogramas a través de los puntos de paso, a lo largo de cada pasada y entre pasada y pasada para confirmar la fiabilidad de la distribución de los puntos y la consistencia del bloque. Para esto último, un buen paquete de AD debe disponer de un módulo adicional que muestre gráficamente las conexiones con puntos de enlace en el bloque, fotograma a fotograma y pasada a pasada y permita chequear visualmente el número de rayos por punto, la distribución de puntos en cada fotograma y la posibilidad de ver en una ventana las conexiones con cada fotograma colindante con sólo hacer un clic con el ratón en el número de fotograma, por

ejemplo. De esta forma el operador es capaz de analizar las conexiones en el bloque y medir puntos adicionales en zonas que estén débilmente conectadas.

El objeto del control de calidad es estar seguro de que los resultados obtenidos son correctos por lo que el control de calidad se basa en el análisis de la estabilidad del bloque (geometría, conexiones) y las precisiones de los parámetros de orientación, de los puntos de control y puntos de enlace. Para ello, los programas disponen de distintas herramientas de análisis.

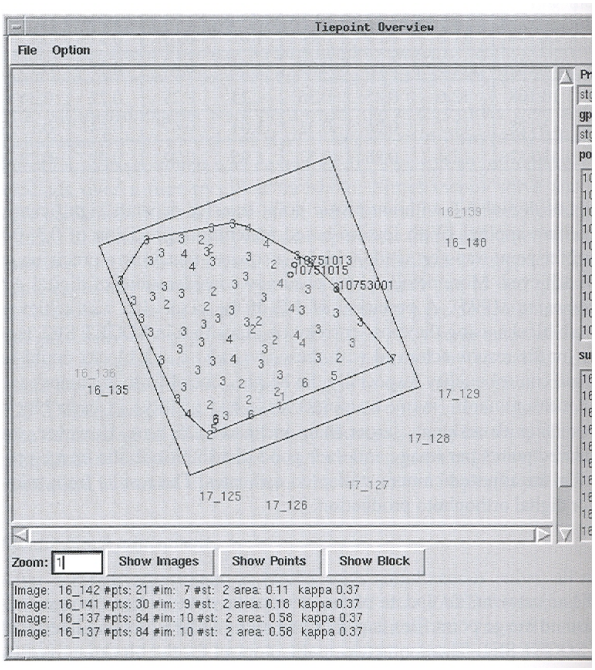


Figura 9. Captura de pantalla

En la captura de pantalla que se muestra está visible la siguiente información:

- todos los puntos medidos en ese fotograma. El número (3, 4, 5..) indica en cuantos fotogramas está medido el punto
- perímetro de la imagen 16_137
- Números de las imágenes conectadas alrededor del perímetro. Haciendo click sobre ellos deberían aparecer en pantalla los perímetros correspondientes con sus puntos
- Distintos colores para diferenciar los puntos medidos en dos imágenes con recubrimiento de los restantes.

Con estas herramientas gráficas se pueden detectar zonas con escasez de puntos de paso, las cuales deben ser remedidas para añadir manualmente más puntos de paso.

También es necesaria otra herramienta gráfica que muestre los puntos de control, de chequeo, de paso y vectores con los residuos y elipses de error en cada punto. Es muy útil poder

visualizar las elipses de error, pues aunque no muestran el error verdadero, que sólo puede conocerse en los puntos de control, si que muestran el máximo error que puede tener un punto calculado. Los puntos que hayan sido medidos en dos fotogramas únicamente, tendrán una mala intersección en el espacio de los rayos y sus elipses serán grandes y poco redondas.

El tamaño y forma de las elipses de error también está afectado por la geometría del bloque, por ejemplo, en el centro del bloque sólo debería haber elipses pequeñas y redondas mientras que en los bordes del bloque las elipses deberían ser mas grandes y si aparece una elipse grande en el centro del bloque habrá que chequear el número de puntos de enlace, la calidad de los puntos, la geometría, etc. . Si se aprecia que las elipses de error siguen un determinado patrón en la forma, ello es debido a que existe algún sistematismo no corregido (la refracción, la esfericidad, etc). La situación ideal es aquella en la que el tamaño de las elipses es parecido y además la forma está repartida de manera aleatoria.

También debe existir una herramienta de búsqueda que permita localizar en el bloque un cierto punto de enlace o punto de control y muestre información de sus desviaciones estándar.

En el control de calidad, el primer paso es asegurarse de que las desviaciones estándar obtenidas son acordes con las desviaciones estándar de partida. Las precisiones de partida deben estar bien calibradas para obtener en el cálculo la mayor precisión posible. Para ello los programas disponen de la posibilidad de asignar a los puntos de control un peso proporcional a la precisión con que se obtuvo en campo.

Valores generales para bloques con buena calidad de imagen, rica textura y buena identificación de puntos de control son las siguientes:

a) Puntos de contol, X,Y .

Teniendo en cuenta que en imagen digital la identificación de puntos está limitada por la estructura del píxel, normalmente la precisión puede ser de un tercio de píxel por lo que la desviación estandard planimétrica de los puntos de control se puede estimar en:

σxy = 1/3 píxel x escala de la imagen. Ej: pixel=20micras, escala=1/40000,

σxy = 1/3 x 20 / 100000m x 40000 = 27 cm

Esta es la precisión en la medida en el fotograma. La precisión del punto de apoyo medido en campo es σXY = 0.5m dependiendo de método de medición y la precisión total será:

$$(\sigma xy^2 + \sigma XY^2)^{1/2}$$

b) Puntos de control, Z

Depende del factor base / altura de vuelo. $\sigma z = \sigma xy$ x H/B

La relación B/H para un vuelo con focal = 150mm, formato 230mm, y recubrimiento longitudinal del 60% es: 0.4 x 230 / 150 = 0.61, de ahí: 1/ (H/B) = 1.5 por lo que:
$\sigma z = 1.5 \ \sigma xy$ es decir, la precisión en altimetría es 1.5 veces peor que la precisión en planimetría.

c) Puntos imagen, la precisión depende de que la medición sea manual o automática.
$\sigma i_manual = 1 / 3$ píxel ; $\sigma i_auto = 1 / 5$ píxel, siendo 1/5 un valor empírico.

d) GPS. Si están disponibles las coordenadas de los centros de proyección, la precisión de éstas debe ser superior a 0.3 m para que el ajuste lo pueda soportar.

e) INS. Si están medidas las tres rotaciones en vuelo, podrán entrar en el ajuste sólo como valores aproximados pues la precisión con que se miden 0.015º = 54'' debe ser refinada por el cálculo de la aerotriangulación.
Dependiendo de cómo estén calibrados estos valores se obtendrá distinta precisión para el ajuste.
Para evaluar la calidad del ajuste hay que comparar el sigma final con el sigma inicial. Una Chi cuadrado con el cociente de estos valores multiplicado por la redundancia nos informa de la correcta calibración de las precisiones iniciales. Los residuos en los puntos de control y chequeo obtenidos por la diferencia entre las coordenadas ajustadas y las medidas en campo también dan la calidad del ajuste. Si hay puntos fuera de tolerancia habrá que variar su precisión inicial. Los residuos estandarizados de los puntos medidos, permiten localizar errores groseros pues aplicando el test de Baarda, todos los mayores de tres son puntos mal medidos.
También hay que revisar el fichero Log , con el resumen de todas las operaciones realizadas en el cálculo. Por ejemplo, si en las iteraciones que corresponden a los niveles piramidales mas bajos algo va mal, el ajuste puede ser no convergente y hay que averiguar donde se produce el problema.
Estudiando las desviaciones estándar, se tiene una estimación de la precisión, pero no es suficiente, también hay que estudiar la fiabilidad para saber que cantidad del error es absorbido y que cantidad es mostrado en los residuos. Se necesita para ello la matriz de cofactores de los residuos que viene dada por: $Qvv = W - AN^{-1}A^T$
Por último, es fundamental la distribución de los puntos en campo. Con la incorporación del GPS/INS se necesitan muy pocos puntos de campo sin embargo, hay que tomar la precaución de duplicar estos puntos en las esquinas del bloque pues los errores en esas zonas son absorbidos por el bloque y no se detectan.

Los tests que se han realizado con distintas configuraciones de apoyo en campo, están publicados y deben tenerse en cuenta al planear la campaña de campo.

Un bloque que no cumpla los requerimientos de distribución y calidad y cantidad nunca ajustará o lo que es peor, podrá falsear los resultados repartiendo errores. Un bloque apoyado con sólo tres puntos de control, en teoría puede calcularse pero si un punto tiene un error grosero, será repartido entre todos los puntos de enlace, pasará inadvertido y dará buenos residuos. La solución es tener muchos puntos de chequeo.

Bibliografía

[1] Digital Photogrammetry vol.1, de Toni Schenk, ed.

[2] Se puede consultar: Modern Photogrammetry de Mikhail y Bethel

[3] OEEPE workshop on automation in digital photogrammetric production, junio 1999

[4] Reference manual MATCH-AT de Inpho

[5] Apuntes de Fotogrametría Digital de Francisco Papi.

Tema 36. Sensores de estado sólido en fotogrametría: Fundamentos de los sensores de imagen y características de los sensores CCD. Escáneres fotogramétricos: tipos de escáneres, características generales y calibración. La cámara métrica digital: diseño, características y calibración. Barredores lineales: fundamento y características. Ventajas e inconvenientes de los barredores lineales respecto a las cámaras métricas digitales.

36.1. Fundamentos de los sensores de imagen y características de los sensores CCD

La resistividad a la conducción eléctrica en un cuerpo queda determinada por el numero de electrones que tiene en la capa externa, llamada banda de valencia, de su estructura atómica, En determinadas condiciones se pueden activar a los electrones para que pasen de la banda de valencia a otra de mayor energía llamada banda conductora, originándose una corriente eléctrica en este transporte de electrones.

El máximo numero de electrones en la banda de valencia es de ocho, de manera que todos los cuerpos como los gases nobles que tienen esta banda completa son buenos aisladores y aquellos elementos que tienen seis o siete electrones en su banda de valencia también son buenos aisladores, mientras que los que solo tienen dos o tres electrones en dicha capa, como los metales, son buenos conductores y tienen mucha predisposición a ceder dichos electrones a los átomos mas próximos.

Existen otros elementos llamados semiconductores, que son cuerpos sólidos con una resistividad intermedia entre los conductores y los aisladores. Generalmente forman cristales tridimensionales donde los átomos están muy próximos entre sí, existiendo una gran interacción entre ellos ya que cada átomo al tratar de completar su banda de valencia necesita compartir electrones con los átomos más próximos y de esta manera conseguir que dicha capa quede completa. Estos enlaces entre átomos se llaman covalentes y originan estructuras cristalinas.

Veamos los diagramas correspondientes a los aisladores y a los semiconductores.

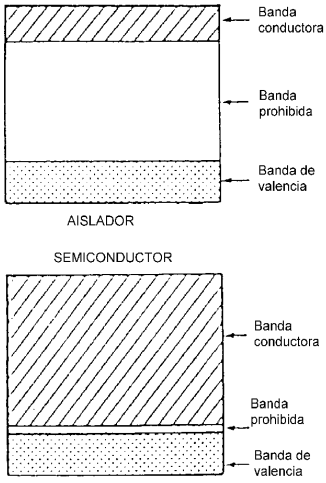


Figura 1.

Se llama bandas prohibidas a aquellas capas de energía que no pueden ser ocupadas por los electrones.

Estos materiales se utilizan para componentes electrónicos en estado sólido, siendo algunos de ellos dispositivos muy sensibles a la luz. Sin embargo, se pueden romper algunos de los enlaces covalentes con la consiguiente liberación de electrones que entonces se pueden mover libremente actuando como portadores de carga y contribuyendo a la conductividad análogamente a los electrones libres en los metales, para ello se activan los electrones en el semiconductor para que pasen de la banda de valencia a la conductora originándose una corriente en la que solo participa los electrones libres de la banda conductora.

Es posible "estimular" a los semiconductores con impurezas apropiadas y se usan dos tipos de agentes estimulantes:

1. Los donantes que sirven para producir electrones libres, entonces el semiconductor se convierte en uno de tipo negativo (-n). Estos electrones libres se pueden mover bajo la influencia de un campo eléctrico, dejando al donante fijo con carga positiva.

2. Los aceptores que pueden capturar electrones, produciendo así una carga positiva llamada agujero (hole). Estos agujeros son móviles, y pueden crear un semiconductor tipo positivo (-p) en la conducción. De manera análoga un agujero libre deja un aceptor espacialmente fijo con carga negativa.

Es importante señalar que un semiconductor no se carga por las impurezas estimulantes, los tipos -n o -p solo implica carga libre (electrones o agujeros) manteniéndose la neutralidad.

El semiconductor más importante para la industria y también para los sensores de imágenes es el silicio.

Generación de fotocargas en el semiconductor

Cuando un fotón es absorbido por el semiconductor se creará un par de cargas libres. Es decir, la iluminación de un semiconductor con una longitud de onda lo suficientemente corta provoca la producción de un par de cargas móviles, electrones y agujeros, que pueden recombinarse inmediatamente.

De la generación y movimiento de las fotocargas se derivan dos efectos físicos:

1. Fuerzas electrodinámicas que actúan sobre las cargas
2. Difusión (consecuencia termodinámica) que tienden a extender o propagar las partículas del mismo tipo para distribuirlas por partes iguales.

Recogida y almacenamiento de las fotocargas

Tan pronto como las parejas de fotocargas se crean se separan inmediatamente para evitar su recombinación, esta separación se realiza con los capacitadores MOS integrados (metal-oxido-semiconductor) que tienen la siguiente estructura:

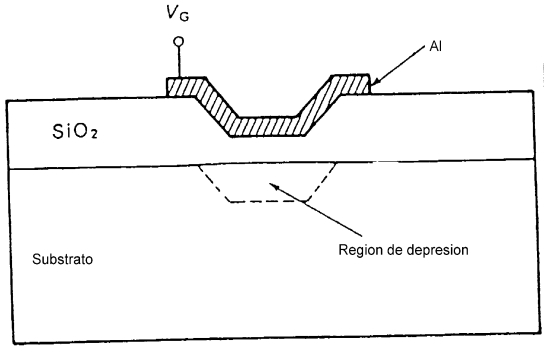


Figura 2.

Cuando aplicamos un voltaje positivo a la entrada del MOS la mayoría de las cargas positivas (holes) son repelidas debido a que la capa de SiO_2 es un buen aislador por lo que no pasa corriente entre el aluminio y el semiconductor, causando en la región de este (substrato) situada justamente debajo del electrodo un desplazamiento de cargas positivas, pero no un flujo eléctrico.

Debido a este desplazamiento de cargas positivas, se forma una región de depresión que contiene cargas negativas debido a los electrones acumulados en esta zona (interface substrato-SiO_2) y donde las cargas positivas (hole) son conducidas al fondo del substrato.

Transporte de las fotocargas

Para el transporte de fotocargas las estructuras MOS se colocan unas al lado de otras creando el dispositivo de doble carga (CCD), desarrollado en 1970.

El CCD esta integrado por un conjunto de capacitadores MOS caracterizados por tener un canal extremadamente largo y un conjunto de puertas muy próximas entre si, situadas entre los electrodos (fuente y de drenaje).

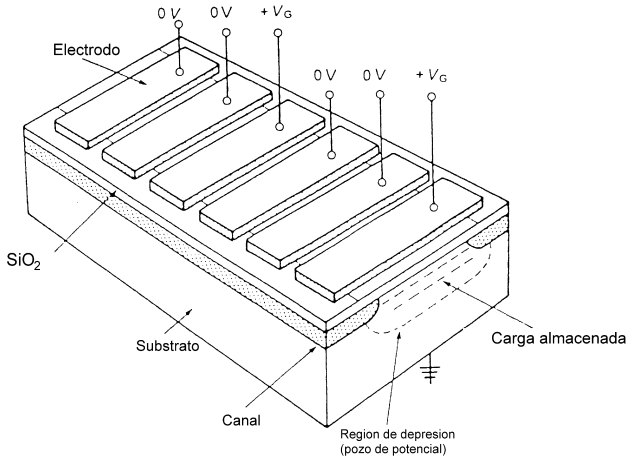


Figura 3.

Manipulando los voltajes aplicados a los electrodos se va transfiriendo carga desde un MOS al vecino y así sucesivamente a lo largo del canal.

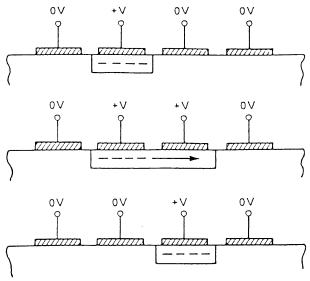


Figura 4.

Los electrodos se conectan en grupos de tres o cuatro y cada grupo se llama fase.

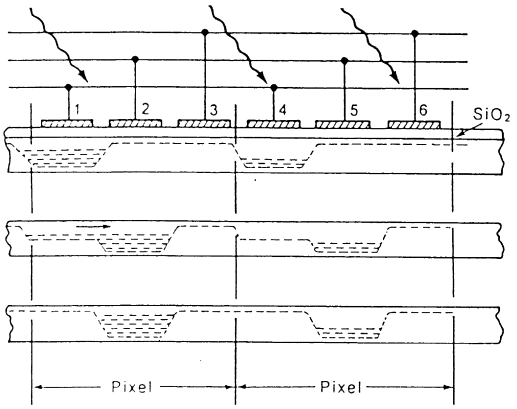


Figura 5.

Si el voltaje positivo aplicado al primer electrodo es mayor que el aplicado al segundo y al tercero, se formará un pozo de electrones en la región del substrato situada debajo del primer electrodo.

Si ahora aplicamos un voltaje positivo al segundo electrodo se igualarán las zonas de depresión debajo de los electrodos primero y segundo, es decir el pozo de cargas se desplaza a la derecha y si a continuación decae el voltaje aplicado al primero y continua el aplicado al segundo todos los electrones se desplazarán a la región situada debajo del segundo electrodo creándose un nuevo pozo de potencial.

Detección de fotocargas eléctricamente

Un sensor de imágenes esta formado por píxeles de manera que cada píxel detecta y almacena un cierto número de fotocargas que se corresponde linealmente con la intensidad de luz incidente y con su superficie. Las señales de la fotocarga se amplifican y se convierten en señales de voltaje y los sensores CCD transfieren la fotocarga desde los píxeles hasta el amplificador.

Características de los sensores CCD

Geométricas: La resolución geométrica viene dada por la función de transferencia de modulación (FTM) que representa la degradación de la señal de entrada en función de la frecuencia espacial y es la base para la definición de la función de contraste. Esencialmente depende de la óptica del sistema y del propio sensor, de manera que la función de transferencia de modulación del sistema FTM_S se calcula multiplicando las funciones de transferencia individuales FTM_{OPTICA} y $FTM_{PÍXEL.}$

Radiométricas: Se debe procurar que la relación entre señal y ruido (SNR) sea óptima. Dicha relación viene dada por la expresión:

$$SNR = \frac{n_S}{\left(\sigma_S^2 + \sigma_R^2 + \sigma_{DL}^2\right)^{1/2}}$$

Siendo: n_S señal electrónica, σ_S^2 varianza de la señal electrónica, σ_R^2 varianza del ruido dependiente del tiempo y σ_{DL}^2 varianza de las diferencias locales de sensibilidad.
La señal electrónica es directamente proporcional a los fotones recibidos para un intervalo restringido de longitudes de onda. El ruido dependiente del tiempo para un sensor CCD contiene eventuales ruidos de señal con baja señal, ruidos de inicialización, ruidos de transferencia y otros ruidos electrónicos.

Eficiencia cuántica: Es la relación entre el número de electrones capturados por un fotodiodo y el número de fotones que inciden sobre el fotodiodo durante un periodo de tiempo.

Lag: Es el porcentaje de carga que permanece en el fotodiodo después de que se haya completado el ciclo de transferencia de dicha carga.

Crosstalk: Es el término usado para describir la difusión de la carga fotogenerada del lugar de origen hasta un fotodiodo.
Eficacia en la transferencia de carga

Eficacia total de transferencia (TTE): Al total de la carga que permanece en un estado del CCD después del mecanismo de registro de todo el CCD es denomina y depende de la eficacia de una sola transferencia (CTE).

Blooming: Es el fenómeno que ocurre cuando se supera la capacidad de carga del fotodiodo o del dispositivo de registro. La zona del espacio de carga se colapsa a medida que la carga fotogenerada se esta integrando, desapareciendo finalmente cuando se ha alcanzado la capacidad de carga. Si la absorción de fotón continua, la carga fotogenerada adicional se difunde a los fotodiodos vecinos contaminando la imagen.

36.2. Escáneres fotogramétricos: tipos de escáneres, características generales y calibración

Se han desarrollado varios modelos y según el barrido se puede distinguir:

1. -Lineales. Barre la fotografía en bandas paralelas y cada banda es un conjunto de sensores independientes.
2. -Matriciales. Explora zonas de la foto y posteriormente las une numéricamente, para ello dispone de un canevás de cruces cuyas coordenadas son conocidas.

La base de la exactitud del escáner esta en la mecánica de la plataforma y en el software de calibración. Por esta razón, los escáneres fotogramétricos han de ser planos (flat-bed) ya que son los únicos que pueden garantizar la estabilidad geométrica por lo que los escáneres de tambor (drum-scaner) solo se usan en artes gráficas. La película positiva o negativa se sitúa en un carro central sobre una placa de vidrio que mantiene la planeidad y que ha de tener una superficie de 230 mm x 230 mm. como mínimo La base plana que contiene a la película se desliza en la fase de exploración lo que implica que dicho movimiento esté sincronizado con la iluminación, algunos escáneres tienen un mecanismo que proporciona la corrección "Time Delayed Integration" (TDI) del movimiento relativo entre el sensor y la plataforma que contiene a la película.

En cuanto al sistema de iluminación se debe conseguir una buena radiometría para lo cual es necesario una apropiada fuente de luz, por lo que la película debe ser iluminada mediante fuentes de gran intensidad y amplio espectro. Se utiliza luz difusa obtenida con cristales esmerilados, tubos fluorescentes o mediante una esfera recubierta de dióxido de magnesio, siendo este método el que últimamente se utiliza más en los escáneres fotogramétricos

Las "regiones de interés" es una característica de algunos escáneres y es la posibilidad de escanear áreas especiales de la película que el usuario ha seleccionado previamente. Cada región puede tener una única colección de atributos de escaneo (positivo, negativo, color, monocolor, resolución, etc.).

Algunos están dotados de un "sistema integrado de aerotriangulación digital" con el propósito de incrementar la eficacia del proceso de aerotriangulación y en este caso son capaces de proporcionar imágenes escaneadas con baja resolución para todo el bloque fotogramétrico y zonas de alta resolución en cada fotograma localizadas alrededor del área de medida (zonas de Von Gruber), así estas zonas de alta resolución forman un conjunto de datos fácil de manipular por su escaso tamaño, pero como su posición es conocida con mucha exactitud las medidas digitales en estas zonas dan una precisión muy alta.

En cuanto a las características, las más importantes son:

- Tamaño de píxel = 10 micras (mínimo)
- Rango dinámico: 0.1-2.5 (B/N) y 0.1-3.5 (Color)
- Ruido de imagen: 0.02- 0.03 D
- Precisión geométrica: 3 micras mínimo
- Resolución radiométrica (sensibilidad): 8 bits (B/N) y 24 bits color
- Superficie mínima de escaneo: 23 x 23 centímetros
- Correcta calidad en la formación del color

La precisión geométrica viene especificada por la calibración que consiste básicamente en tener parámetros conocidos de la distorsión y de la escala y se han de considerar los aspectos siguientes:

- Los residuos causados por la distorsión y por variaciones en la escala han de ser mínimos y bien conocidos.
- Las diferencias de los valores de escala entre el eje X respecto al eje Y deben ser pequeñas y conocidas.
- El ángulo entre los ejes X e Y es de 90º, o la desviación residual debe ser mínima y conocida.
- La conexión entre segmentos consecutivos de píxeles debe ser muy precisa.
- La precisión ha de ser del orden de 3 micras.

Así como la precisión geométrica es indiscutible no ocurre lo mismo con la radiométrica, de hecho todavía se lanzan preguntas como ¿cuantos niveles de grises tiene un fotograma? y en consecuencia ¿es necesaria una sensibilidad de 6, 8 ó más bits? o es ¿la misma la sensibilidad para fotogrametría aérea que la necesaria para objeto cercano?.

De cualquier manera y sin contestar a la pregunta anterior lo normal en los escáneres es una sensibilidad de 8 bits que corresponde a 256 niveles de gris, e incluso se mejora la resolución ampliando el número de bits de 10 a 12 y posteriormente mediante un tratamiento de software del mismo escáner reducirlo a 8.

La calibración se realiza tanto para garantizar la precisión geométrica como radiométrica.

Calibración geométrica

Se realiza mediante placas de vidrio cuadriculadas (grid plate). Estas placas, en su versión más difundida, tienen un tamaño de 25 x 25 cm, con una cuadrícula de 1 cm, siendo la precisión exigida a la definición de esta malla del orden de 2 a 3 micras.

Para alcanzar una alta precisión geométrica (3 micras) y con bajos errores accidentales, lo que se hace es obtener los parámetros de un modelo de error en el que van incluidos todos los errores sistemáticos del sistema (distorsión de las lentes, movimientos no lineales de la plataforma, aumento de errores, y detección de errores de montaje).

Calibración radiométrica

Mediante una calibración especial, la escala y el offset de cada píxel es determinado. Estos valores son almacenados y usados para corregir el valor del píxel de salida. Como resultado, son producidas imágenes radiométricamente muy precisas**.**

36. 3. La cámara métrica digital : diseño, características y calibración

En su diseño la cámara digital difiere de la de cámara convencional en que esta sustituye la película por sensores CCD.

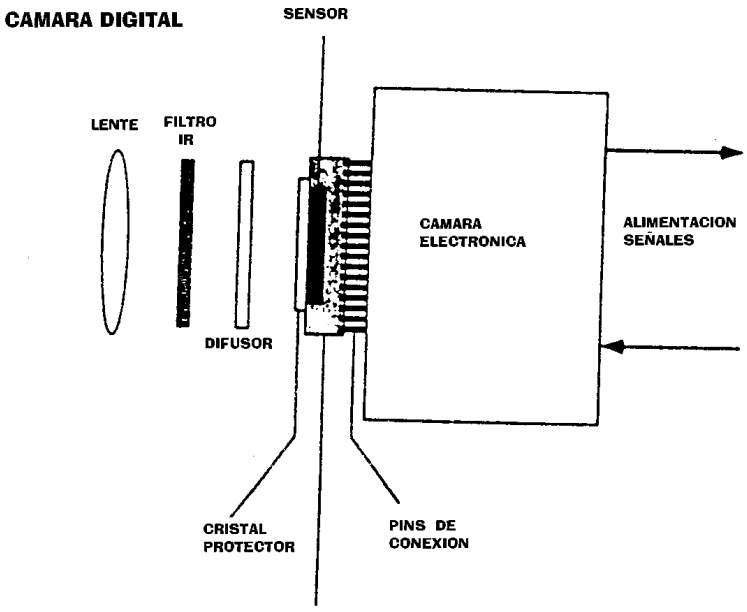


Figura 6.

Los sensores CCD son matriciales y el tamaño de la matriz, considerado como el conjunto de filas y columnas, y el tamaño de cada píxel son las características más importantes para el uso de estas cámaras en fotogrametría. Por razones económicas y tecnológicas, de momento no es posible escoger la solución ideal de un único sensor CCD con un tamaño similar a los formatos de película analógica existentes, así que estos tamaños están limitados por la tecnología actual y hoy día se acepta la posibilidad de llegar a fabricar matrices de 5.120 x 5.120 píxeles y tamaño de una micra por píxel. Un parámetro importante es el TDI (Time Delayed Integration) que es utilizado para compensar en las imágenes el movimiento del objeto respecto a la cámara.

Un método para la toma de imágenes consiste en lograr que todos los conos se abran en el mismo instante, obteniendo imágenes desde centros de proyección distinto, así cada imagen digital es la resultante de todas las imágenes tomadas todas en el mismo instante. Estas cámaras, por ejemplo la DMC de Z/I , constan de varios módulos de sensores CCD matriciales pancromáticos de alta resolución, además de otros módulos multiespectrales de menor resolución. Los módulos se encuentran montados dentro del marco óptico de la cámara de modo que cada CCD tiene sus propias lentes. Al mismo tiempo, se establece un montaje fijo que asegura el alineamiento preciso de los ejes ópticos de cada uno de ellos.

Los módulos CCD de los sensores pancromáticos tienen pequeños ángulos de inclinación que dan lugar a una representación geométrica de la toma fotográfica similar a la que se muestra en la siguiente figura.

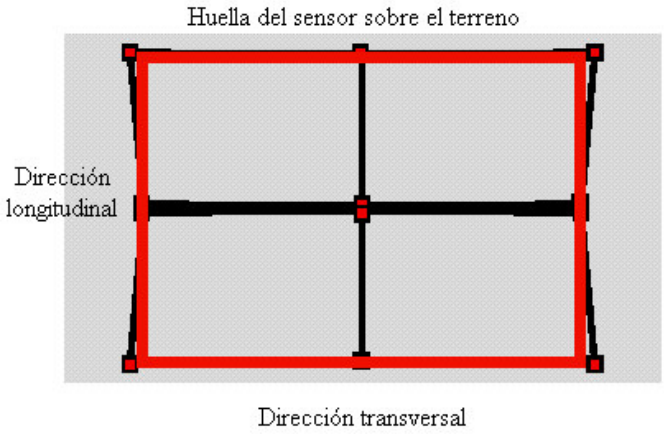


Figura 7.

Debido a la convergencia de sus ejes ópticos, existe una parte común de imagen en cada uno de ellos que se utiliza posteriormente para la rectificación y mosaicado en la obtención final de una imagen convencional de perspectiva cónica. Por esta razón, el formato real de la imagen abarca así una mayor porción útil de terreno.

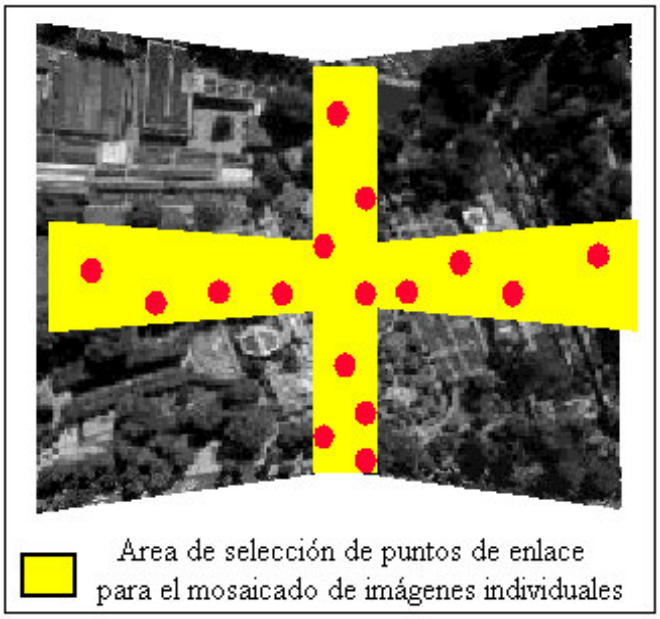


Figura 8.

En el caso de la cámara Z/I puede llagar a ser de unos 8000x14000 píxeles y la disposición de los módulos es la que se muestra en la anterior figura y consiste en colocar las 4 cámaras pancromáticas en el centro del cuerpo principal y los sensores multiespectrales se disponen uno en cada esquina del mismo y rodeando a los módulos pancromáticos. El tamaño del píxel de cada sensor CCD es de 12 x 12 micras. En el caso de los módulos multiespectrales se dispone de 4 sensores, uno sensible al rojo, otro al verde, otro al azul y otro más al infrarrojo. Cada módulo lleva incorporado un disparador y un obturador en una unidad compacta óptico-electrónica situada en cada uno de los módulos CCD. Por tanto, uno de los principales es conseguir la sincronización precisa de todas las lentes para asegurar la exposición de todas las imágenes en exactamente el mismo intervalo de tiempo excluyendo así errores geométricos. Las imágenes obtenidas en vuelo se someten a correcciones radiométricas, correcciones geométricas, mosaicado de imágenes simples pancromáticas para formar una imagen virtual y obtención de imágenes a color por composición.

Otro método consiste en hacer varias tomas desde el mismo punto de vista, haciendo las exposiciones en distintos instantes que dependen de la velocidad del avión y de la estructura de la cámara, la composición de todas estas imágenes formará la imagen definitiva y obtención de imágenes a color por composición. Un ejemplo es la Vexcel

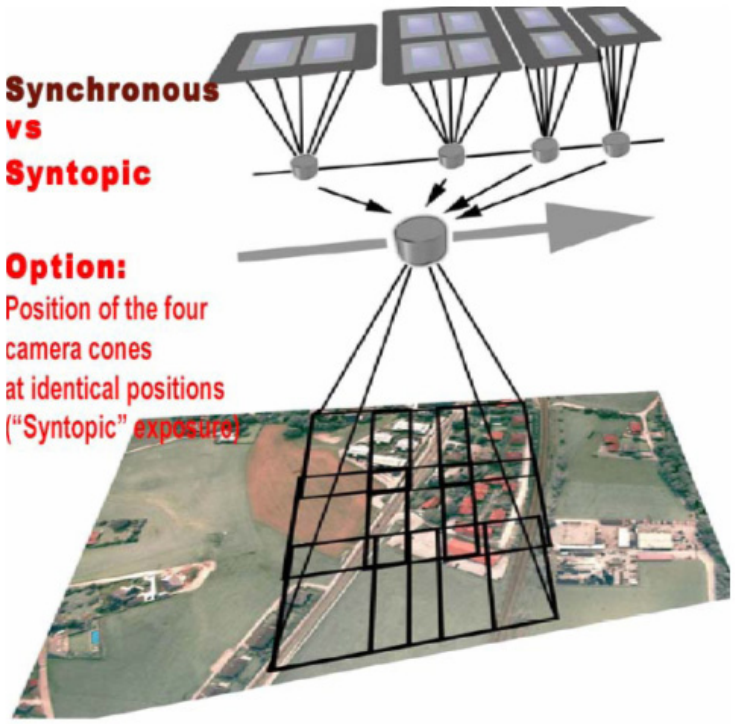


Figura 9.

La cámara produce unas imágenes de un tamaño de 11500 píxeles en toda la banda y 7500. En esta solución hay un sistema de coordenadas único y un único centro de perspectiva para todas las imágenes que luego formarán la imagen total.

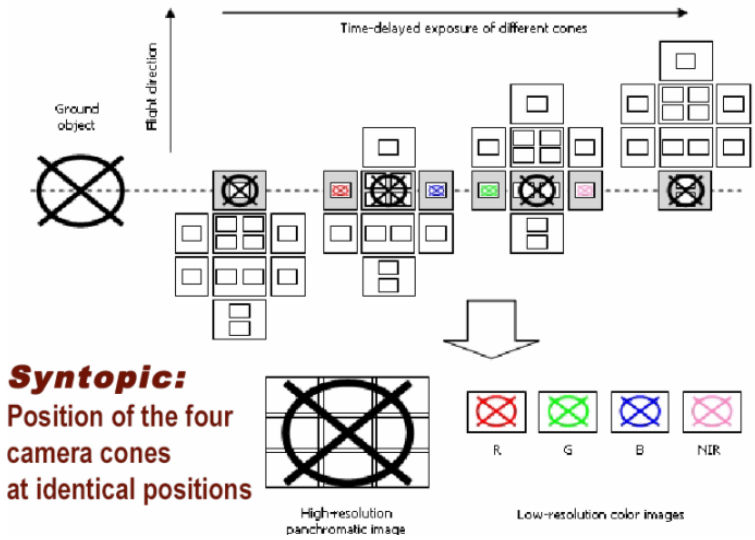


Figura 10.

Las características más importantes de las cámaras digitales son:

Estabilidad geométrica: El sensor produce directamente imágenes digitales por lo tanto exentas teóricamente de distorsiones, siempre y cuando se controle la temperatura. De esta manera, la posición de cada píxel en la imagen digital está perfectamente conocida (a diferencia de las imágenes analógicas que sufren distorsiones, las cuales provocan importantes problemas en la Fotogrametría).

Sensibilidad: Los sensores CCD por tener una respuesta lineal a la luz ocurre que en sobre-exposiciones la película convencional puede discriminar valores de gris, pero las cámaras con sensores CCD dan peor respuesta al quedar saturados los píxeles a lo largo del sensor, esto se corrige con dispositivos "anti-blooming".

Salida digital: La salida directa en formato digital evita los procesos de revelado o de escaneado y además se puede disponer y controlar la calidad de la imagen en tiempo real.
Características espectrales: Los sensores CCD son sensibles desde el ultravioleta, aunque su uso no es correcto debido a la difusión atmosférica en dicha región, hasta el infrarrojo que aunque pueda ser útil en algunas aplicaciones en los trabajos del espectro visible se deben de utilizar filtros para eliminar dicha radiación.

Eliminación de marcas fiduciales: Dado que los sensores matriciales son geométricamente muy estables, la posición de cada píxel puede ser perfectamente determinada en una imagen digital, es decir no son necesarias las marcas fiduciales para el proceso de orientación como ocurre con las películas convencionales.
Color: Las tomas en color con cámaras digitales no son tan sencillas como con las cámaras convencionales y esta complicación aumenta al aumentar el tamaño de la matriz de sensores CCD.

CÁMARA	DIGITAL	TRADICIONAL
Estabilidad geométrica	Muy buena	Distorsión de la película
Sensibilidad	Muy buena (=2000 ASA)	200 ASA
Datos	Digitales	Analógicos
Características espectrales	0.4 a 1 micra	Pancro. ,IR. Color
Marcas fiduciales	No necesita	Necesarias
Color	No es fácil con sensor matricial	Fácil

Tabla 1. Cuadro resumen

En cuanto a la calibración, esta es necesaria para asegurar una métrica correcta y conseguir buena calidad de imagen.

El proceso de calibración se lleva a cabo en dos pasos:

- En el primero cada uno de los cuerpos ópticos de la cámara debe llevar su proceso propio de calibración
- En el segundo después de montar cada uno de los cuerpos ópticos en la plataforma de la cámara, ésta debe sufrir otro proceso de calibración consistente en controlar internamente la posición relativa de las cabezas ópticas dentro de la plataforma.

Los valores obtenidos para cada cuerpo óptico son almacenados y empleados en la fase de post-proceso de las imágenes. Estos valores consisten en dar las posiciones relativas entre sí, la distancia focal calibrada y ciertas referencias radiométricas que sirven para ajustar la distinta sensibilidad de cada matriz de sensores CCD.

Calibración de cada cuerpo óptico simple

Cada cuerpo óptico debe ser calibrado teniendo en cuenta aspectos geométricos y radiométricos.

Calibración geométrica de cada cuerpo óptico

La calibración geométrica es muy similar a la orientación interna llevada a cabo en las antiguas cámaras analógicas y lo primero que se tiene en cuenta es el modelo de corrección de la distorsión óptica a emplear en los cuerpos de lentes. Por tanto, la expresión que lleva a cabo la corrección de la distorsión óptica es la siguiente:

$$\Delta x = \Delta x_0 - \frac{\overline{x}}{\overline{z}}\Delta f + \overline{x}(r^2K_1 + r^4K_2 + r^6K_3) + (r^2 + 2\overline{x}^2)P_1 + 2\overline{xy}P_2 + \overline{x}B_1 + \overline{y}B_2$$

$$\Delta y = \Delta y_0 - \frac{\overline{y}}{\overline{z}}\Delta f + \overline{y}(r^2K_1 + r^4K_2 + r^6K_3) + 2\overline{xy}P_1 + (r^2 + 2\overline{y}^2)P_2$$

En este modelo, modelo de distorsión óptica de Australis o polinomio de Brown. las correcciones se llevan a cabo con respecto a los valores de longitud focal, punto principal, distorsión radial, distorsión por descentramiento, corrección afín y cizalla. Aunque realmente los que se tienen en cuenta son los siguientes:

Parámetros de distorsión radial

$$\Delta r = r^3 K_1 + r^5 K_2 + r^7 K_3,$$

Parámetros de distorsión por descentramiento

$$\Delta x_d = (r^2 + 2\overline{x}^2)P_1 + 2\overline{xy}P_2$$
$$\Delta y_d = 2\overline{xy}P_1 + (r^2 + 2\overline{y}^2)P_2$$

El resto de parámetros del polinomio de corrección se considera despreciable.

El procedimiento de calibración empleado para las cámaras analógicas es el método del colimador, ya que permite obtener las distorsiones en cada cuadrante del espacio imagen de la cámara. Pero en el caso de las cámaras digitales este método no es del todo válido ya que uno no puede mirar a través de un CCD.

Por tanto, el método a seguir es el siguiente. Se dispone de un colimador que consiste en un pequeño anteojo con una lente, cruz filar y sistema de iluminación. Este colimador se coloca a distintas posiciones angulares con respecto al punto principal de la cámara dando lugar a varias punterías impresionadas sobre el CCD. Las posiciones angulares sobre las que se coloca el anteojo colimador corresponden a valores angulares fijos y bien conocidos.

Figura 11.

Una vez obtenidas las imágenes de todas las posiciones del colimador se lleva a cabo un proceso de medición empleando una correlación por mínimos cuadrados basada en niveles digitales para determinar la posición imagen de las punterías o cruces filares sobre el CCD. De esta forma se obtienen las posiciones de todas las cruces correlando cada una de ellas con las otras. Después

de esta fase de correlación, los valores angulares y de posición se usan en un ajuste de bloque simultáneo con autocalibración para el cálculo de los parámetros de distorsión óptica y longitud focal de calibración.

La calibración radiométrica de cada cuerpo óptico.

La calibración radiométrica se aplica a cada sistema óptico por individual. Se hace para corregir simples defectos de las matrices CCD y para compensar las diferentes sensibilidades a la luz de cada píxel individual y de cada CCD mediante la aplicación de un offset radiométrico en función de la temperatura y de la apertura relativa del diafragma.

Figura 12.

Además, para el caso de las imágenes multiespectrales se debe aplicar una corrección más debido al uso de un filtro. También debe tenerse en cuenta el número de translaciones usadas durante la exposición en el caso de accionamiento del TDI para evitar el emborronamiento de la imagen.

La calibración geométrica de la plataforma.

La calibración de la plataforma conlleva dos tareas principales. La primera es que en el montaje de las cabezas ópticas pancromáticas debe conocerse, la situación relativa entre sí, con total exactitud para asegurar la total validez de la imagen mosaicada final. Y la segunda es que las imágenes de color deben combinarse con la pancromática para obtener la composición color natural o infrarrojo. Por tanto, dada la figura siguiente se aprecia la disposición de las imágenes

pancromáticas individuales sobre la imagen virtual final.

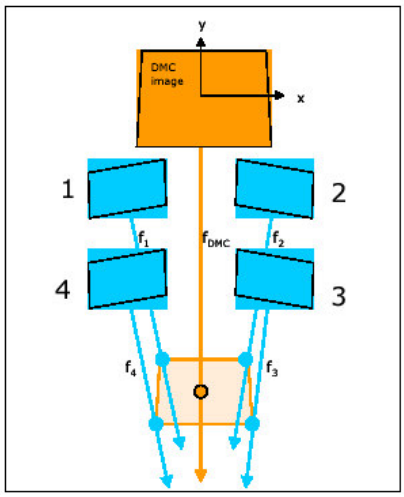


Figura 13.

Así se obtiene un sistema de coordenadas de la plataforma. Las longitudes focales f1, f2, f3 y f4 se calibraron por separado mientras que la longitud focal de la cámara tiene un determinado valor para la imagen mosacaida (en la DMC de Z/I es de 120 mm). El centro de proyección de la imagen virtual es el centro del plano definido por los centros de proyección de las cuatro imágenes pancromáticas. Pequeñas discrepancias en la altura de los puntos nodales desde el plano focal no son relevantes, ya que las translaciones resultantes en la imagen mosaicada son muy pequeñas y pueden ser despreciables. Por tanto, el montaje de los cuerpos ópticos pancromáticos dentro de la plataforma se puede modelar por un grupo de parámetros de orientación externa dados por tres posiciones y tres ángulos con respecto a un origen. Así, en esta fase de calibración de la plataforma se da la posición de cada centro de proyección pancromático con respecto al centro de proyección de la imagen virtual. Estos valores proceden siempre de la información de la construcción de la cámara o fase de calibración de la plataforma. Por lo tanto, cada vez que se desmonte una cabeza óptica deberá calibrarse de nuevo.

Para la determinación de los ángulos ω, χ y φ de orientación de cada cabeza óptica se realiza una toma de imágenes sobre una placa con marcas de puntería cuyas posiciones sean conocidas. Después, se lleva a cabo una fase de medición de esas marcas situadas en las zonas de solape mediante un proceso de correlación LSM. Y finalmente las coordenadas imagen medidas y las conocidas de las marcas de puntería entran en una fase de ajuste simultáneo dando como resultado los valores angulares ω, χ y φ de cada sensor, así como los valores de distancia aunque estos pueden ser despreciados. Por tanto, estos valores obtenidos se deben aplicar a todas las imágenes tomadas después de esta calibración y que asegurará la correcta correlación de imágenes en la fase de mosaicado.

Posteriormente la calibración se suele afinar en campo y consiste en obtener las imágenes de zonas experimentales en las que hay uniformemente distribuidos puntos señalizados y cuyas coordenadas se conocen con gran precisión. Las señales son de distinto tamaño y forma para cada punto con el fin de poder efectuar medidas automáticas (correlación) y además para poder identificar en campo cada punto. La calibración se efectúa para cada color independiente, para evitar aberraciones cromáticas. El método consiste en que una vez efectuadas la tomas de imágenes se calculan los elementos de cada haz y se introducen también como incógnitas los elementos de la orientación interna, dados por la distancia principal y las coordenadas del punto principal. Además se calcula el polinomio correspondiente a la distorsión radial y tangencial (modelo de Brown). Normalmente la corrección de todos los errores se hace ampliando, con nuevas incógnitas, el modelo matemático utilizado habitualmente en el ajuste por haces y cuya ampliación, conocida como método de ajuste con parámetros adicionales, corrige los elementos de la orientación interna de la cámara, los posibles errores sistemáticos debidos a la cámara, factores atmosféricos, otras causas de error debidas al vuelo y los errores de medida.

Conviene hacer varias calibraciones seguidas para obtener la estabilidad de la cámara, que será función de la variabilidad de los resultados obtenidos en cada prueba. Los resultados se suelen expresar en píxeles.

36.4. Barredores lineales: fundamento y características

En estos instrumentos de adquisición de imágenes el método consiste en la captura de forma simultánea de tres líneas del terreno transversales a la dirección de vuelo, para ello utilizan tres sensores lineales con diferentes inclinaciones (frontal, nadiral y trasero).

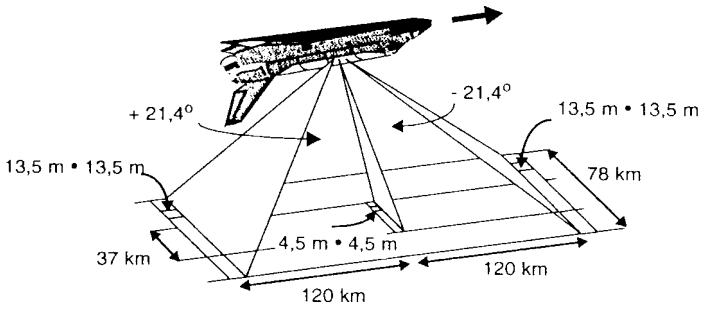


Figura 14.

Como la trayectoria del avión está expuesta a desviaciones, las correcciones geométricas del barredor se basan en los cambios dinámicos que sufren los sensores durante el vuelo y para la determinación de los parámetros de corrección no basta solamente con los puntos de control habituales para un bloque fotogramétrico sino que son necesarios mayor número de puntos para obtener los parámetros de orientación de cada línea barrida. En este tipo de sensores se introduce también el sistema de compensación TDI.

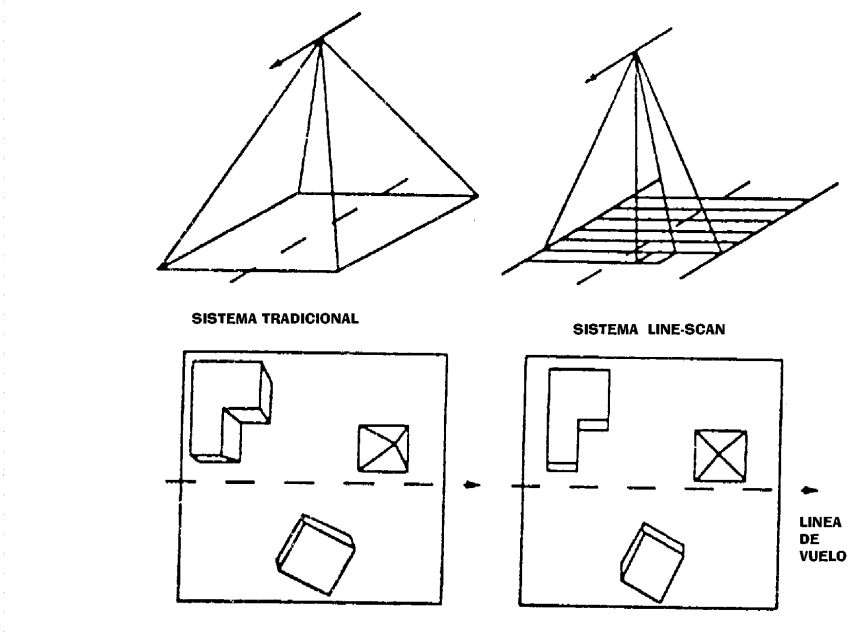


Figura 15.

Las técnicas de barrido (line - scaner) generan una geometría en la imagen capturada que difiere esencialmente de la obtenida por cámaras fotográficas, la fotografía aérea es una proyección central y la del barredor está formada por bandas. La estereoscopía se consigue combinando las tres imágenes y las características más importantes ya que condicionan el tratamiento fotogramétrico son:

- Todos los puntos del terreno aparecerán en las tres imágenes
- En cada banda existen tantos centros de proyección como líneas componen la banda
- En cada una de las líneas nadirales existe un píxel central en el que el desplazamiento debido al relieve es nulo

La transformación de un punto imagen a un punto terreno, se realiza mediante las fórmulas de

colineación. Pero en este tipo de imagen es preciso la rectificación de cada línea de la imagen.

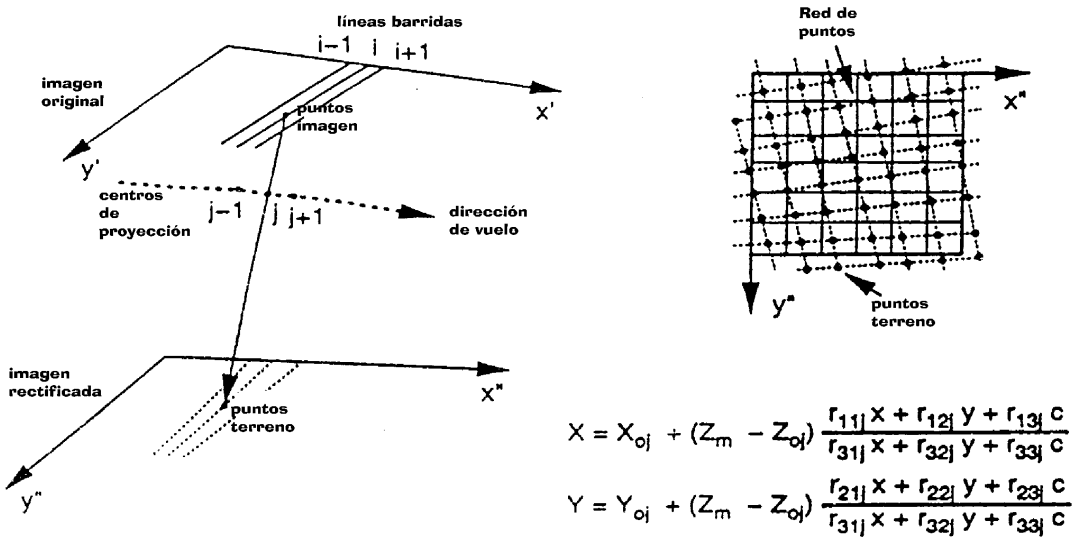


Figura 16.

Las fórmulas anteriores son válidas para líneas independientes.

Es decir, la imagen sufre deformaciones distintas a las de la fotografía convencional. La imagen original tiene las líneas de barrido paralelas y en la imagen rectificada las líneas anteriores pierden su paralelismo. Cada línea precisa de puntos de control terrestre para su correcta rectificación y esto se logra con la utilización de posicionamiento de GPS e INS que se incorporan al sensor.

La calibración en este tipo de sensores, incluye como en las cámaras métricas digitales, dos aspectos diferentes, por una parte está la calibración geométrica y por otra la radiométrica.

La calibración geométrica se hace en laboratorio con un colimador semejante al empleado en las cámaras digitales y supone una medición automatizada con un goniómetro vertical construido especialmente para determinar las posiciones de cada sensor CCD del plano focal. La calibración radiométrica se hace utilizando una gran esfera de Ulbricht. Luego se procede al método de autocalibración para refinar los valores obtenidos en el proceso anterior y está basado en volar una zona experimental con puntos perfectamente identificables y de coordenadas conocidas con gran precisión. Pero en este tipo de imagen es preciso el ajuste para cada línea de la imagen.

36.5. Ventajas e inconvenientes de los barredores lineales respecto a las cámaras métricas digitales

Cámaras métricas

Las ventajas más importantes son:

- Buena estabilidad y definición geométrica
- Existe la posibilidad de compensar el movimiento (Forward Motion Compensation)
- La geometría es la usual en fotogrametría, es decir la imagen es una perspectiva.
- El tratamiento es el mismo que en las cámaras convencionales y se puede utilizar para fotogrametría cartográfica como para otras aplicaciones
- Tiene la posibilidad de tratamiento on-line de la información (sin necesidad de revelado ni de escaneo, lo que supone un ahorro de costes y de tiempo)

Los inconvenientes son:

- Dificultades para construir cámaras de color
- Caras
- Poca resolución geométrica. Para conseguir una resolución geométrica de siete micras con un formato de 23 x 23 cm., para una película en color y con un poder de resolución radiométrico de 12 bits, la información almacenada sería de 4.5 Gigas., esto hoy en día no supone un problema de almacenamiento pero si en cuanto a transferencia de datos.

Sensores lineales

Las ventajas más importantes son:

- El color es posible utilizando tres sensores lineales
- Tienen buen rango dinámico y es barato
- La aparición de todos los puntos del terreno en las tres bandas de imágenes es una importante ventaja, al proporcionar una mayor robustez a los resultados obtenidos de la correlación cuando se utiliza el método de identificación automática de puntos homólogos en múltiples imágenes (múltiple image matching).

Los inconvenientes son:

- La inestabilidad geométrica debida a movimientos del avión origina perdida de píxeles en la imagen, siendo necesarias plataformas de gran estabilidad
- La geometría de la imagen no es la usual en fotogrametría, lo que origina entre otras cosas, que no sirva para aplicaciones fotogramétricas no cartográficas.
- Para utilizar las imágenes es necesario disponer de los parámetros de orientación externa de cada línea

- Un inconveniente es necesitar en el cálculo un mayor número de incógnitas en los sistemas de ecuaciones de la orientación. Se resuelve con los sistemas de posicionamiento GPS/INS.

Bibliografía

[1] Greve, C. Digital Photogrammetry. An Addendum to the Manual of Photogrammetry, pág. 4-9

[2] Miguelsanz, P., Fundamentos Técnicos Cámara DMC

[3] Lebert, F. y Gruber M. UltraCam-D Cámara digital de gran formato

[4] Kraus, K. Photogrammetry Vol 1.Dummiers Verlag. Bonn 1993

[5] Kraus, K. Photogrammetry Vol 2. Dummiers Verlag. Bonn 1996

[6] Slama, Ch., Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry 1980

Tema 37. Estaciones fotogramétricas digitales: Características y esquema general. Distintos sistemas de visión estereoscópica. Procesos de restitución. Superposición de ficheros. Aplicaciones en control de calidad y actualización cartográfica.

37.1. Características y esquema general

La Fotogrametría ha sufrido en los últimos años importantes cambios con la utilización de imágenes digitales cuya disponibilidad y demanda es cada vez mayor. A esto han contribuido los continuos desarrollos y perfeccionamientos de los distintos componentes utilizados en los ordenadores y estaciones de trabajo y sobre todo la posibilidad de visión estereoscópica en monitores adaptados a un ordenador.

Una estación fotogramétrica de imágenes digitales es un nuevo instrumento fotogramétrico cuyo funcionamiento y modelo matemático se basa en cálculos de fotogrametría analítica, junto con las aplicaciones y las técnicas necesarias para el tratamiento digital de imágenes. Se pueden definir como el conjunto de hardware y software que desempeñan diversas tareas fotogramétricas de manera automática o interactiva.

Su empleo ya está extendido y admitido desde la aerotriangulación hasta la obtención de ortofotos, pasando por el proceso de restitución, obtención de DTM, etc. y sus aplicaciones en control de calidad, actualizaciones, generación de mosaicos, etc., es ya normal en las distintas instituciones fotogramétricas y cartográficas.

Los factores que han permitido y propiciado la introducción de esta nueva técnica, los podemos resumir en los siguientes puntos:

1. Avances en los procesadores, almacenamiento, resolución de los monitores, etc. de los ordenadores y estaciones de trabajo.
2. Desarrollo de los sistemas de captura y tratamiento de imágenes digitales.
3. Bajada de los precios de los productos informáticos, tanto en los soportes lógicos como físicos, en relación con el alto precio de los instrumentos formados por elementos ópticos y mecánicos de precisión como es el caso de los restituidores.

Las características más significativas son:

1. La entrada de datos es siempre en forma digital con lo que la información es estable y siempre se puede editar.
2. El entorno de trabajo es automático e interactivo.

3. La base matemática es la misma que en los restituidores analíticos pero con la ventaja de que no existen problemas de desgaste, calibración, ajuste, etc., al carecer de elementos ópticos o mecánicos, siendo siempre el proceso de medida constante en cuanto a precisión y fiabilidad.
4. La universalidad es total, pudiéndose utilizar todo tipo de escalas de imagen con independencia de fotos terrestres o aéreas.
5. El empleo es más cómodo para el operador (mayor ergonomía) y al tener un elevado grado de automatización es más fácil su manejo, requiriéndose menor experiencia.
6. Permiten desde el mismo entorno de trabajo la realización de distintas tareas fotogramétricas y cartográficas (estaciones todo propósito) y además con cierto grado de automatismo, según los algoritmos y aplicaciones implementadas, lo que aumenta la producción y eficacia en los flujos de trabajo.
7. Admite la posibilidad de que varios usuarios puedan acceder simultáneamente a la visión estereoscópica del modelo pudiendo contrastar distintos criterios de restitución y fotointerpretación.
8. La superposición de ficheros ráster y vectoriales es más efectivo que en los restituidores analíticos, siendo esta utilidad muy importante para trabajos de actualización y control de calidad.

El esquema general depende de su estructura y configuración depende de las distintas firmas comerciales y de la posibilidad de ejecución de diversas tareas fotogramétricas, obedeciendo al esquema siguiente:

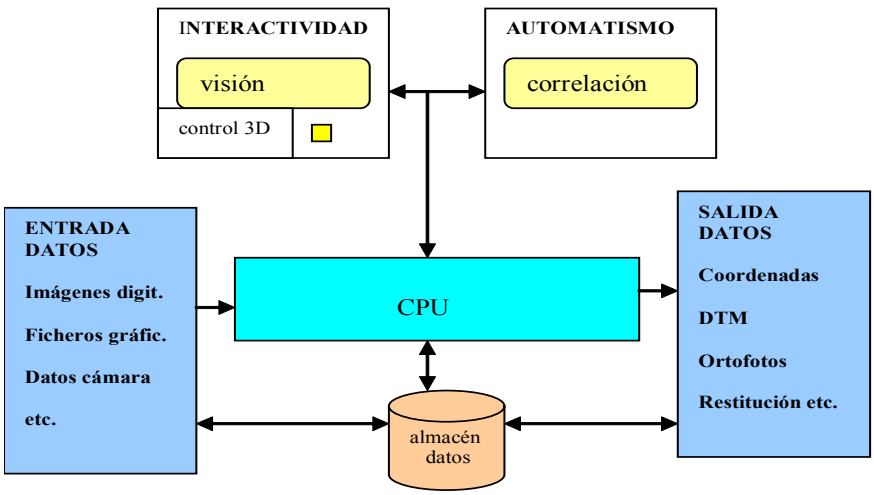


Figura 1.

Los elementos básicos son:

Subsistema de procesado y capacidad de almacenamiento de datos. Es el núcleo más importante ya que controla el software, la interface de usuario y la transferencia y comunicación de datos. Existen distintas opciones y configuraciones aunque la tendencia actual es el empleo de ordenadores personales adaptado al sistema operativo Windows, abandonando hace mucho tiempo los sistemas que corrían bajo UNIX que encarecían los precios del Hardware y el mantenimiento del Software.

Funciones del procesador de imágenes. En las estaciones digitales el procesador de imágenes está encargado de realizar múltiples funciones entre las cuales hay que destacar:
Controlar la presentación en pantalla de las imágenes izquierda y derecha alternativamente y del modelo estereoscópico.
Controlar el módulo de orientación interna manual y/o automática y la externa de cada imagen y las orientaciones relativas o absoluta de cada modelo
La importación y exportación de imágenes de satélites (SPO, LANDSAT, IRS).
Cargar las teselas de las imágenes derecha e izquierda desde el disco no solo en el despliegue inicial sino durante el movimiento o deslizamiento de las imágenes en la pantalla (panning).
Mantener y deslizar la imagen estereoscópica por la pantalla a través del sistema de control (ratón 3D, manivelas y pedal, etc.).
Posado del índice en el terreno mediante el dispositivo adecuado (ratón, pedal, etc.).
Refrescar el índice.
Aplicar zoom a las imágenes estereoscópicas durante la carga desde el disco.
Permitir la selección en el menú de varias funciones del proceso de imágenes (color del cursor, valor de zoom, cambio de contraste, etc.).
Controlar la superposición de los datos vectoriales almacenados en el disco o en memoria y hacer que se muevan al mismo tiempo que la imagen estereoscópica.
Establecer la correlación entre píxeles durante el proceso de medida de puntos en la aerotriangulación o en el cálculo de los modelos digitales del terreno.

Subsistema de visión. La edición de ficheros vectoriales y de imágenes digitales requiere monitores de alta resolución, como mínimo 1280 x 1024 píxeles con ocho bits en color o veinticuatro en falso color. Debe tener la posibilidad de editar la información gráfica de forma monoscópica o estereoscópica, a veces se recurre a un segundo monitor para la introducción de datos, empleo de menús y ejecución de tareas. Para mejorar la visión existen una serie de funciones, como son el brillo, el contraste, etc. que actúan sobre la imagen y el campo

observable de la vista ha de tener el máximo poder de resolución pero aún es pequeño comparado con un restituidor analítico

Hay dos principios básicos para el movimiento del cursor respecto a la imagen:

En un caso la imagen es fija y el cursor es móvil (panning), este método tiene el inconveniente de que rápidamente se agota el campo de visión, sobre todo el seguir detalles lineales, teniendo que estar editando continuamente nuevas vistas lo que genera fatiga en el operador.

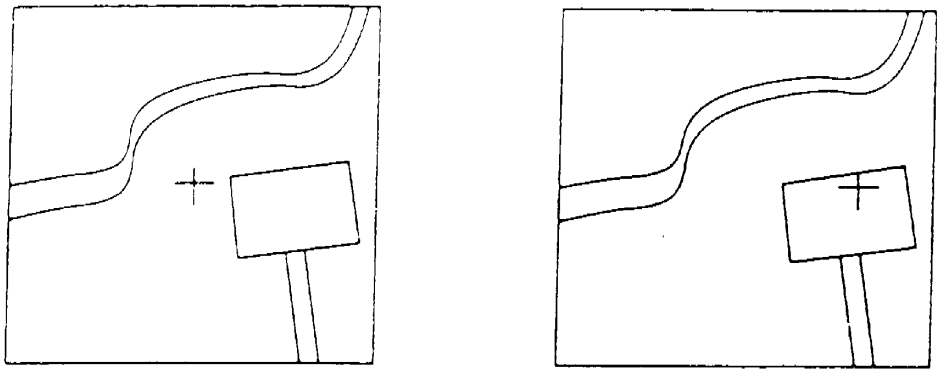


Figura 2.

En el otro caso, el cursor es fijo manteniéndose siempre en el centro de la pantalla (sobrevuelo) lo que requiere una mayor prestación del subsistema gráfico.

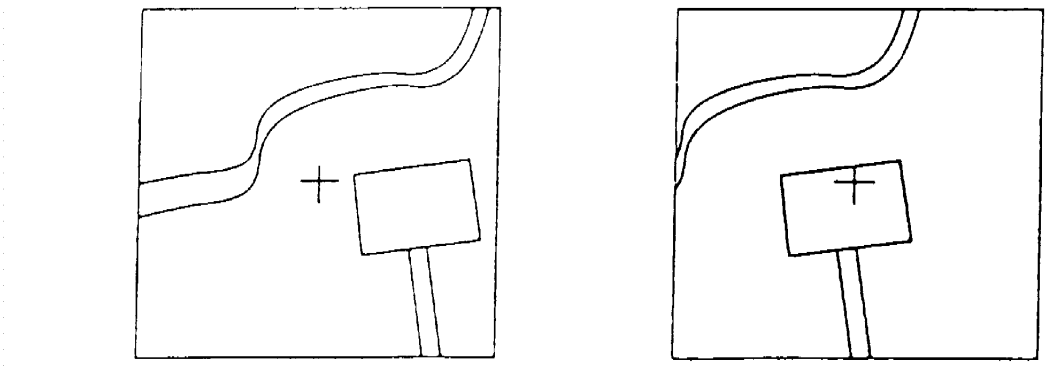


Figura 3.

Interactividad. Es una de las partes más estudiadas y cuidadas en el diseño de estaciones digitales debido a la falta de automatización en algunas tareas fotogramétricas. La interactividad se precisa en el subsistema de visión y en los dispositivos de control y ha de ser eficaz al trabajar tanto en dos como tres dimensiones.

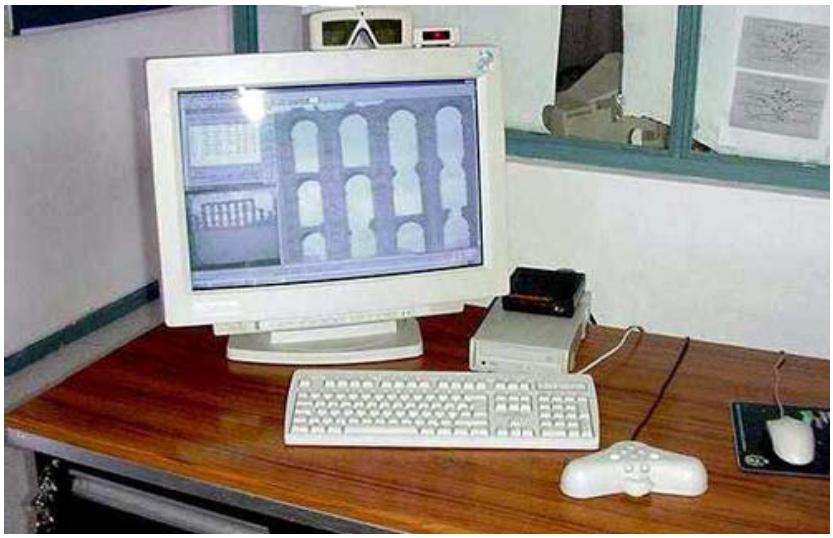


Figura 4.

Subsistema de control (Interface de usuario). El posicionamiento (posado) en el píxel (o subpíxel) es un requisito esencial en las estaciones digitales. El cursor (marca flotante) debe estar claramente definido y siempre ha de estar visible para todo tipo de terreno correspondiente a la imagen escaneada. Por esta razón las estaciones suelen llevar cursores de distintas formas, tamaños y colores.

Un ratón especial es el elemento de control usado con más frecuencia, aunque a veces también se utilizan pedales y manivelas para los movimientos (aparentes) altimétricos y planimétricos de la marca flotante.

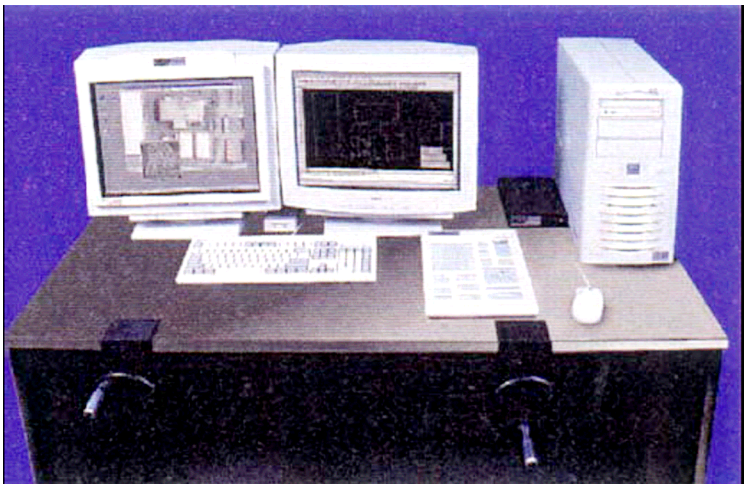


Figura 5.

37.2. Distintos sistemas de visión estereoscópica

Visión estereoscópica. La visión estereoscópica requiere la separación de las dos imágenes del par estereoscópico y dicha separación se puede realizar de varias formas:

1. Temporal. Se basa en una edición en pantalla alternativa para cada imagen.
2. Radiométrica. Utiliza la polarización (pasiva o activa), o el sistema de anaglifos.
3. Espacial. Consiste en partir la pantalla y utilizar un estereoscopo.

En algunos casos se utilizan varios métodos combinados siendo los mas frecuentes la combinación de separación temporal con la polarización pasiva o activa.

Gafas pasivas. Consiste en superponer al monitor un modulador de cristal líquido que actúa como filtro de células polarizantes. La polarización es circular y el refresco de la pantalla es de 60 Hz. . La modulación del cristal líquido se sincroniza con el procesador gráfico, de manera que cambia la polarización con la misma frecuencia y al mismo tiempo que las imágenes son editadas en la pantalla. Unas gafas (pasivas) con un cristal polarizado en sentido vertical y el otro en sentido horizontal decodifican las imágenes y proporcionan la vista relativa solo al ojo correspondiente pero a gran velocidad, produciéndose la visión estereoscópica.

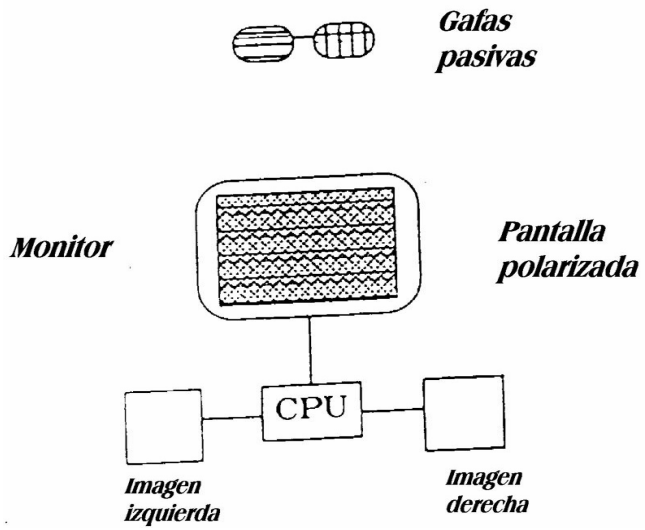


Figura 6.

Gafas activas. Las imágenes se editan alternativamente en la pantalla con una frecuencia de 120 Hz., pero en este caso las gafas (activas) llevan para cada cristal un obturador independiente (LCS = Liquid Crystal Shutter) que separa las imágenes. La edición en pantalla y los obturadores están sincronizados mediante un emisor de rayos infrarrojos que se coloca encima del monitor. De esta manera el operador ve alternativamente la imagen izquierda y derecha

(incluyendo la marca flotante) a tal velocidad que se produce la fusión de imágenes y por lo tanto el efecto estereoscópico.

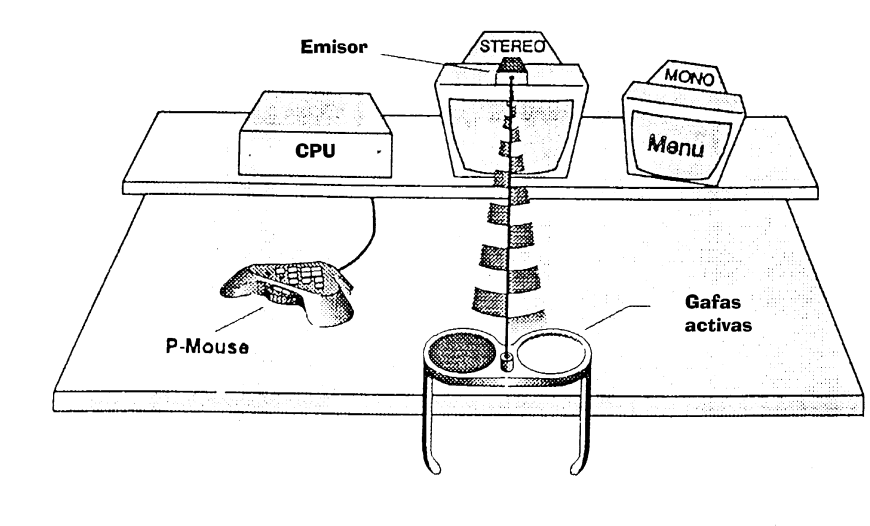


Figura 7.

Estos métodos permiten la visión de imágenes en color, la superposición de ficheros y que varios operadores puedan ver el modelo simultáneamente, pero adolecen del inconveniente de que hay una reducción del brillo en comparación con un monitor normal debido a la doble frecuencia y a la absorción de luz por la polarización de la pantalla (caso de gafas pasivas) o por el obturador en el otro método (gafas activas).

El primer método respecto al segundo tiene las ventajas de que permite la visión estereoscópica casi con un ángulo de 180º, de que el conmutador (controlador) está unido físicamente a la pantalla por lo que no puede ser interferido y de que las gafas tienen una montura estándar y no necesitan mantenimiento.

La ventaja del segundo método es que produce buenas separaciones de imágenes y un alto rango dinámico.

Método espacial. El método consiste en montar un estereoscopo de espejos enfrente de la pantalla y editar cada imagen (izquierda y derecha) en media pantalla.

Tiene el inconveniente de que al partir el monitor se reduce el área observable del modelo, pero en cambio tiene la ventaja de que crea un entorno de trabajo muy similar al de los restituidores analíticos, además puede utilizar monitores y adaptadores gráficos más simples.

Una solución a este método es utilizar dos monitores, uno para cada imagen, incrementando de esta manera el área observable. Es posible la edición de imágenes en color y aplicar la

superposición, pero el modelo estereoscópico solo puede ser observado por un operador y no por varios simultáneamente.

Figura 8.

Método de anaglifos. Consiste en utilizar la técnica de anaglifos, presentando una imagen en rojo y otra en verde correspondientes a un modelo estereoscópico y utilizar gafas de anaglifos para separar los colores. Con esta técnica no se pueden editar imágenes en color y no se puede aplicar la superposición.

37. 3. Proceso de restitución

Cuando se iniciaba el empleo de estaciones digitales fotogramétricas se planteaban dudas en cuanto a precisiones y eficacia en el proceso de restitución, entendiendo por restitución, además de la propia restitución, todo tipo de tareas fotogramétricas que al no ser totalmente automáticas requerían la presencia continua de un operador. Además cuando se trabajaba con grandes escalas, había cierto temor en cuanto a la precisión métrica del posado, así como en la fotointerpretación de los detalles topográficos como consecuencia de una mala calidad de imagen. Hoy en día, ya no hay ningún tipo de reparo al disponer directamente de imágenes digitales procedentes de vuelos fotogramétricos hechos con cámara digital y obviando, por lo

tanto, el proceso de escaneo. En cualquier caso siempre se puede hacer la consideración de que escaneando fotogramas con una resolución mayor de 15 micras se logra una gran calidad de imagen, equiparable a la conseguida en loe restituidores analíticos.

Por otro lado, el trabajo con imágenes digitales ofrece la posibilidad de automatizar partes sustanciales de la cadena de producción fotogramétrica, logrando que los resultados reduzcan los sesgos introducidos por el operador, disminuyendo los tiempos de producción al hacer los procesos más rápidos y además está la ventaja añadida de que las estaciones digitales son más baratas que los restituidores analíticos, al carecer de componentes óptico-mecánicas.

Procesos de automatización

La automatización puede ser total (en proceso batch) o parcial (semiautomática), aunque siempre tendrá que existir una parte del trabajo que es interactiva. Los procesos en batch son posibles para la orientación interna con la medida automática de marcas fiduciales, en la orientación relativa mediante técnicas de correlación de imágenes, en la transferencia y medida de puntos en la aerotriangulación cuando en este caso el operador se posa exactamente en el punto en una de las imágenes y el sistema busca automáticamente las foto-coordenadas de ese punto en la otra imagen (o imágenes), en la generación de modelos digitales del terreno y en las transformaciones geométricas de la imagen como son la obtención de ortofotos, además la automatización existe también en diversas aplicaciones como pueden ser el cálculo de imágenes epipolares, hacer vistas perspectivas,....etc.. Para estas tareas juegan un papel esencial los algoritmos de identificación automática de imágenes homólogas (image matching) o algoritmos de correlación.

Pero a pesar de la automatización, siempre hay tareas similares al proceso de restitución como la de corregir interactivamente las zonas de mala correlación, tanto cuando esta técnica se emplea para hacer la orientación interna, externa o relativa, así como en el cálculo de modelos digitales del terreno, cuya depuración se ejecuta recurriendo a procesos interactivos en los cuales el operador se posa en el terreno para obtener la cota correcta y el sistema genera el nuevo resultado que es a su vez visualizado, comprobado y si fuese necesario corregido de nuevo. En el caso de los modelos digitales, es frecuente la necesidad de que el operador mediante procesos de restitución obtenga líneas de ruptura y cotas de puntos altimétricamente importantes como son los collados, cimas, etc., con el fin de completar los puntos obtenidos por correlación.

Extracción de los detalles topográficos

Se han desarrollado diversos algoritmos de seguimiento automático de líneas, que se aplican para determinar carreteras, contornos de edificios y otros detalles lineales fácilmente reconocibles.
Estos procesos se pueden realizar de forma que el algoritmo sugiera automáticamente candidatos para el punto que va a ser medido (un punto de paso, por ejemplo), para un cierto detalle o para situar rótulos en el mapa. Estas sugerencias son verificadas y aplicadas por el operador.

Restitución fotogrametrica

En las estaciones digitales el trabajo de restitución consiste en ejecutar una serie de operaciones previas a la restitución y cuya finalidad es la adquisición y carga de los ficheros que contienen las imágenes, las coordenadas de los puntos de apoyo y de la aerotriangulación, la calibración de la cámara, los parámetros del vuelo, etc. y que habitualmente son las siguientes:
Creación del fichero del proyecto. Es único para todo el proyecto y consta de los siguientes ficheros:

- Nombre del proyecto
- Fichero de puntos de control
- Fichero de calibración de la cámara

Creación del fichero del modelo estereoscópico. Se crea uno para cada modelo y consta de los siguientes ficheros:

- Nombre del modelo (dentro del fichero del proyecto)
- Imagen izquierda y derecha
- Fichero de orientaciones internas y externas (o relativa y absoluta) del modelo
- Fichero de restitución

Para la formación correcta del modelo estereoscópico y posterior restitución, es necesario hacer:
Orientación interna, manual o por identificación automática de las marcas fiduciales, y orientación externa o una vez hecha la orientación interna, hacer la orientación relativa manual o por correlación automática de puntos homólogos y por último hacer la orientación absoluta que siempre es con posado interactivo.

Hechas las orientaciones comienza el proceso de restitución
La planimetría, salvo el seguimiento automático de líneas, siempre es un proceso interactivo, sin embargo la restitución de la altimetría se puede hacer restituyendo convencionalmente o a partir

de un modelo digital de terreno generado automáticamente por correlación, el cual posteriormente se podrá utilizar para generar las curvas de nivel.

Elección del tamaño de píxel

Una cuestión que se plantea es la elección del tamaño de píxel para el proceso de restitución, en fotogrametría analógica, la escala de fotograma se fija en función de la precisión en la determinación de altitudes, en grandes escalas, o por la posibilidad de identificación de detalles en pequeñas escalas y generalmente, lo que se hace, es estudiar la escala para ambos casos, altimetría y planimetría, y se elige la mas óptima, que es la menor de las obtenidas para economizar el número de fotogramas del proyecto. Cuando se va a trabajar en fotogrametría digital, la elección del tamaño del píxel, se hace de manera que, el contenido cualitativo de la fotografía debe ser totalmente representado, sin que sufra pérdidas respecto a la imagen original, si procede de un vuelo analógico, y una medida de la resolución de la matriz de píxeles para que sea equivalente a la resolución geométrica de la foto original es un problema propio de la teoría de muestreo y puede obtenerse por el factor Kell que establece que:

$$2{,}8 * p = 1000 / n$$

siendo p el tamaño del píxel en micras y n el número de pares de líneas por milímetro, que expresa la resolución de la foto original. Por ejemplo, en 70 pares de línea por milímetro el tamaño del píxel seria por tanto de p = 5,1 micras.

Esto es, desde un punto de de vista práctico, absurdo si consideramos que el tamaño del grano en una fotografía es normalmente del orden de 10 micras o más. Es decir obtenemos unos valores para los tamaños del píxel demasiado pequeños para ser significativos, dado el tamaño del grano de la fotografía aérea, por lo que es mas practico obtener formulas empíricas que relacionan la escala de fotograma con el tamaño del píxel.

Para la altimetría se estudia la precisión de posado estereoscópico y para ello se recurre a la siguiente expresión:

$$\sigma_P = E_F * (P_T / k)$$

donde:

- E_F denominador de la escala de fotograma
- σ_P es la precisión de posado estereoscópico (fijado en un metro en el ejemplo siguiente)
- P_T es el tamaño de pixel
- k es una constante empírica que toma valores entre 0.3 a 0.7 (en nuestro caso k= 0.5)

obteniendo los siguientes valores en función de la escala de fotograma:

E_F	P_T
30.000	60 μm
40.000	50 μm
50.000	40 μm
70.000	25 μm

37. 4. Superposición de ficheros: Aplicaciones en control de calidad y actualización cartográfica.

Las aplicaciones más importantes de un sistema de fotogrametría digital en el entorno de restitución son el control de calidad y la actualización cartográfica. En ambas tareas el método que se emplea es la superposición de los ficheros vectoriales que contienen la información cartográfica con los ficheros ráster correspondientes a las imágenes del vuelo empleado en la restitución o los de un vuelo posterior en el caso de la actualización.

Para comprobar que nuestra documentación cartográfica contiene toda la información necesaria con arreglo a su escala y fines, así como las normas técnicas en cuanto a precisiones y tolerancias, el control de calidad que se realiza tiene un aspecto cualitativo a efectos de fotointerpretación y otro cuantitativo en lo que se refiere a la métrica de la geometría obtenida para los elementos cartográficos representados.

Control de calidad

Una tarea importante es comprobar la calidad de la restitución numérica de todos los modelos restituidos numéricamente que comprende una determinada zona, hoja de mapa o incluso se puede en la actualidad observar estereoscópicamente todo el bloque fotogramétrico, para lo cual, lo que se hace es editar toda la información vectorial en tres dimensiones y superponerla a los modelos estereoscópico formados con las imágenes digitales y parámetros de orientación interna y externa correspondientes al vuelo empleado en la restitución a comprobar. Esta operación en las estaciones digitales es en la actualidad inmediata, ya que los parámetros de orientación interna y externa de cada haz se editan directamente junto a las imágenes correspondientes, formándose todos los modelos estereoscópicos con una gran facilidad y siendo el espacio de coordenadas ráster y vectorial el mismo, al partir ambos de la misma geo-referenciación dada por las orientaciones externas de cada haz perspectivo.

El método tiene la ventaja de ser cómodo, rápido y además extremadamente preciso al permitir ver superpuesto, al operador, el fichero vectorial con la información restituida con la imagen digital, correspondiente al modelo estereoscópico.

Otra ventaja importante es que en las estaciones digitales tenemos la posibilidad de que varios operadores puedan simultáneamente ver la imagen estereoscópica editada en la pantalla lo cual resulta muy útil para contrastar y discutir distintos criterios relativos a la calidad métrica de la restitución y a las discrepancias que puedan surgir en la fotointerpretación.

Actualización y puesta al día

Uno de los más importantes problemas cartográficos es la necesidad de actualización y puesta al día de la información, debido a que esta, bien por la antigüedad del vuelo fotogramétrico empleado en la restitución o bien por la propia dinámica del territorio cartografiado, ha sufrido importantes cambios.

Para la ejecución de los trabajos de actualización se utilizan dos métodos distintos que una vez expuestos se podrán establecer las ventajas e inconvenientes de uno respecto al otro.

El primero de ellos es la aplicación del principio de superposición de la información vectorial ya restituida con las imágenes rasterizadas procedentes de un vuelo fotogramétrico reciente y que por lo tanto a diferencia del control de calidad tendremos que ambos contenidos cartográficos no serán coincidentes debido a las variaciones surgidas entre las diferentes fechas del vuelo, siendo esta labor de supresión, modificación e inclusión de elementos cartográficos con fines de actualización la que realiza el operador con ayuda de un menú exactamente igual que el empleado en restitución, de manera que la codificación de la información incluida o modificada se adapte plenamente a la simbología utilizada en la restitución original.

El flujo de trabajo sería exactamente el mismo que el de control de calidad añadiendo al final la fase de restitución interactiva y edición de la nueva información cartográfica.

El otro método es empleando ortofotos para la actualización de mapas y consiste en generar ortofotos con el vuelo fotogramétrico reciente que es el que vamos a emplear para el proceso de actualización.

La ortofoto tiene la ventaja de que además de contener la riqueza informativa de la foto contiene la métrica convencional de un plano y debido a los parámetros de orientación externa empleados en el proceso de ortoproyección está geo-referenciada, de manera que cada píxel esta unido biunívocamente a una coordenada (X, Y) del terreno.

Aplicando la superposición del fichero vectorial con la ortofoto digital se efectúa el trabajo de restitución "monoscópica", pudiéndose seguir los elementos cartográficos simplemente con el ratón, utilizando un menú de restitución, con el fin de que los elementos se puedan incluir o modificar con la misma simbología empleada en la restitución que estamos actualizando. Los

elementos registrados, aunque sea de forma monoscópica, pueden tener la coordenada altimétrica también, uniendo al menú de restitución el fichero que contiene los datos del modelo digital del terreno que se utilizó para el proceso de ortoproyección

Una ventaja importante de este segundo método es que la tarea de restitución monoscópica no es imprescindible hacerlo en una estación fotogramétrica digital, sino que se puede utilizar simplemente una estación de tratamiento de la información.

Otra ventaja es que al utilizar fotogramas "aislados", no modelos estereoscópicos, la zona se recubre sin necesidad de tener que hacer orientaciones lo que se traduce en una mayor eficacia en cuanto a la producción.

Los inconvenientes de la restitución monoscópica es que no se puede actualizar la altimetría, y esto a veces es necesario cuando los elementos planimétricos modificados influyen en la morfología del terreno y además que se pierde la ayuda de la visión estereoscópica que es muy útil en el proceso de restitución.

Bibliografía

[1] Greve, C. Digital Photogrammetry. An Addendum to the Manual of Photogrammetry, pág. 213-223

[2] Kraus, K. Photogrammetry Vol 1.Dummiers Verlag. Bonn 1993

[3] Kraus, K. Photogrammetry Vol 2. Dummiers Verlag. Bonn 1996

[4] Slama, Ch., Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry 1980

Tema 38. Modelos digitales del terreno: Características. Obtención por técnicas fotogramétricas digitales. Estrategias: geometría epipolar, relación jerárquica de imágenes y redundancia. Precisión y control de calidad de los MDT. Corrección y edición interactiva: obtención de curvas de nivel.

38.1. Modelos digitales del terreno: Características

38.1.1. Introducción

Cuando se habla de MDE (en inglés, DEM) se está hablando del modelo digital de elevaciones, es decir, una representación numérica de las elevaciones. Otras veces se habla del MDT (en inglés DTM) para referirse al terreno, un terreno en el que no hay ni bosque ni edificios y en otras ocasiones se habla del MDS (DSM en inglés), modelo digital de superficie para referirse aquella superficie que se ve desde el avión: el terreno desnudo donde lo haya, los tejados de los edificios y la copa de los árboles. La denominación MDE es una forma general de referirse al MDT y al MDS indistintamente por último, muchas veces se utiliza el acrónimo MDT cuando sería más correcto usar MDE.

Un modelo digital es una representación numérica de algún fenómeno físico o geométrico dentro de un determinado ámbito geográfico, de manera que dicha representación se puede hacer mediante una muestra finita de valores puntuales o lineales o bien a partir de un grupo de funciones matemáticas. Tal representación supone:

a) Una aproximación a la realidad de manera que el modelo no es único, es decir, la misma realidad puede ser descrita por más de un modelo.
b) Un MDT no nos dice mucho más acerca del fenómeno que representa que lo que nos decían los datos originales, lo único es que nos lo dice de otra forma.
c) En el caso de funciones, cada una de ellas sólo es válida para una parte distinta del ámbito que se representa.
d) Continuidad del fenómeno dentro del ámbito donde se representa.

Un modelo digital del terreno (MDT) es una representación numérica de las características topográficas de éste. Generalmente se utiliza una función $Z = f(X, Y)$, donde para todo punto de coordenadas planimétricas (X, Y) dentro del dominio geográfico de la representación se obtiene el valor de la coordenada altimétrica Z.

Las características más importantes son:

1- La variable Z (variable regionalizada ya que liga su valor con su posición espacial) tiene dos aspectos contradictorios, ya que por un lado tiene un carácter aleatorio debido a pequeñas irregularidades del terreno y por otro lado tiene un carácter estructural debido a la tendencia general de la forma del terreno.

2- La variable Z se define en un determinado ámbito del espacio, sobre el que se efectúan las medidas que definen a dicha variable. Se llama soporte al volumen físico sobre el que se efectúan las medidas (paralajes entre puntos homólogos, cotas, curvas de nivel, etc.). El soporte es un parámetro que influye decisivamente en la calidad final del MDT.

3- La variable Z presenta una cierta continuidad, es decir, la cota de un punto esta más relacionada con la cota de los puntos adyacentes que con la cota de los puntos más alejados.

38.1.2. Tipos de estructura de datos

Cualquier tipo de información altimétrica puede ser considerado como un MDT, tendremos pues:

- Curvas de nivel
- Puntos acotados relevantes.
- Líneas estructurales del terreno (líneas de cambio de pendiente, divisorias, vaguadas, etc.).
- Ortoperfiles fotogramétricos.
- Secciones verticales.
- Combinaciones entre dos o más de dichos tipos.

Esta información es la que constituye normalmente el punto de partida para establecer la estructura habitual de un MDT, que pueden ser en forma de:

a) Malla regular. Los puntos muéstrales se encuentran espaciados sobre los dos ejes del sistema de coordenadas adoptado, formando una matriz de altitudes que puede utilizarse muy fácilmente. El ancho de malla puede ser distinto en cada uno de los ejes pero lo más frecuentemente es que sea el mismo, en cuyo caso se trata de una malla cuadrada con lo que basta expresar las coordenadas de un sólo punto para referenciar geográficamente toda la malla. Presentan inconvenientes importantes debido a su deficiente adaptación a las características del terreno, ya que una malla regular no puede representar todos los detalles del terreno (cerros, collados, divisorias, vaguadas, etc.) salvo si se escoge un ancho de malla suficientemente pequeño de modo que las partes más abruptas del terreno no se degraden como para comprometer los objetivos previstos en la explotación. Esto siempre supone el almacenamiento

de gran cantidad de puntos redundantes correspondientes a las partes llanas o de poco relieve, es decir, las mallas regulares son estructuras muy poco eficientes.

Existen muchos formatos para almacenar la malla regular. Excepto el formato puro ASCII, xyz que sólo es un listado secuencial de x, y, z, con n filas, siendo n = Líneas por Columnas de la malla. Primero de todos los puntos de una línea, después los puntos de la siguiente y así hasta completar toda la malla:

414025 4520900 1323.4
414050 4520900 1332.4
414075 4520900 1340.3
414100 4520900 1349.3
414125 4520900 1357.6
414150 4520900 1366.7
414175 4520900 1376.9
414200 4520900 1388.5
399900 4520925 1096.6
399925 4520925 1098.4
399950 4520925 1099.3
399975 4520925 1100.5
400000 4520925 1100.2
400025 452.....

Los demás formatos se basan en una cabecera que indica las coordenadas planimétricas de la primera elevación y el paso de malla. Después viene toda la matriz de elevaciones definida en la cabecera.

Formato Esri:

NCOLS	2900	*nº columnas*
NROWS	2000	*nº filas*
XLLCENTER	399800.000	*coordenada X del punto Sur-Oeste*
YLLCENTER	4520605.000	*coordenada Y del punto Sur-Oeste*
CELLSIZE	5.000	*paso de malla en x, y*
NODATA_VALUE	-9999.000	*valor asignado cuando es desconocida la altitud*

1063.560 1067.601 1068.379 1068.885 1069.155 1069.604 1069.926 1070.192 1070.507
1070.826 1071.101 1071.311 1071.472 1071.537 1071.754 1071.837 1071.939 1072.073
1072.123 1072.188 1072.283 1072.385 1072.527 1072.575 1072.687 1072.706 1072.777
1072.843 1072.947 1073.073 1073.080 1073.195 1073.064 1073.030 1073.038 1073.149
1073.301 1073.477 1073.693 1073.830 1073.935 1074.034 1074.122 10.....

El primer valor de la matriz (1063.560) es la esquina Norte- Oeste

Formato .grd de surfer:

DSAA *etiqueta del producto*
573 785 *número de columnas número de filas*
399900 414200 *X mínima X máxima*
4520900 4530500 *Y mínima Y máxima*
905 1765 altura mínima altura máxima
1095 1097 1098 1099 1100 1100 1101 1102 1103 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1108 1109
1109 1108 1107 1107 1105 1103 1101 1100 1100 1101 1105 1109 1111 1113 1114 1114 1115
1115 1115 1115 1115 1115 1116 1117 1118 1119 1121 1123 1124 1126 1127 1128 1129 1130
1133 1136 1138 1141 1142 1144 1146 1148 1149 1150 1151 1152 1152 1152 1153 1153 1153
1154 1155 1156 1158 1159 1160 1161 1161 1161 1160 1159 11……

414200 - 399900 = (573 – 1) * paso_x .....paso_x = 25

4530500 – 4520900 = (785 – 1) * paso_y .....paso_y = 25

El primer valor numérico de elevación (1095) es del punto situado en fila sur, columna oeste.

Formato IGN:

IGN/MDT25 (malla 25m) 000-0 733325 4321400 745550 4329025 30 2450 Proyecci UTM. Elipsoide Internacional
1234.1315.1316.1316.1317. 318. 919. 920. 922. 923. 924. 926. 927. 928. 930. 931. 932. 931. 931. 930. 928. 926. 924. 922. 920. 918. 917. 915. 913. 912. 9.11. 910. 909. 908. 997. 906. 906. 907.1307.1308.1308.1308. 907.....

Los valores numéricos ocupan 5 caracteres, están escritos en formato Fortran: F5.0, cuatro para la elevación y uno para el punto decimal.

2450/ 5 = 490 columnas (longitud del registro / 5 caracteres por elevación)745550 – 733325 = (490 – 1) * paso malla paso = 25

El primer valor numérico (1234.0) se refiere a la esquina Sur – Oeste. La matriz es la misma que en el formato GRD.

IGN/MDT25	NOMBRE	XMIN	YMIN	XMAX	YMAX	huso	Longitud Registro	ProyecU.T.M. Elipsoiternacion
	427-3	705400	4643700	719600	4653400	30	2450	

1º campo ..... número de la hoja del modelo
2º campo ..... x mínima en metros
3º campo ..... y mínima en metros
4º campo ..... x máxima en metros
5º campo ..... y máxima en metros
6º campo ..... huso UTM
7º campo ..... longitud del registro

El primer dato tiene de " x "; " x ", la x mínima que leíamos en el registro de cabecera. Los siguientes datos de la malla, representan un incremento de 25 m por cada avance. Así el segundo dato Z2, tiene de x = x_min + 25, y = y_min, ...
El primer dato del segundo registro es: x = x_min, y = y_min + 25, ...
En los formatos IGN y GRD la primera línea de la matriz es la línea Sur de la malla, en el formato Esri la primera línea de la matriz es la línea Norte de la malla y para hacer una conversión de formatos, además de cambiar las cabeceras habrá que voltear la matriz para que la primera fila sea la última y viceversa.

b) Malla Variable. Surge para resolver el problema anterior, ya que el ancho de malla varía ajustándose a la morfología del terreno con lo que se consigue menor volumen de almacenamiento. Tiene los inconvenientes de que se pierde la facilidad de uso y de que exige un estudio preliminar del terreno. El resultado final es que no ha sido una alternativa a la malla regular.

c) Red irregular de triángulos (TIN) Es una triangulación espacial del terreno usando como vértices los puntos que constituyen los datos de partida con lo que la adaptación al terreno es óptima y la estructura es también muy eficiente. Los inconvenientes son primero que es necesario establecer la topología de los triángulos, es decir, establecer una estructura que relacione cada triángulo con los vértices que lo delimitan y con los triángulos contiguos y en segundo lugar que su utilización es más complicada que la de una malla regular.

La elección de una malla regular o una TIN la consideración de varios factores, como son los datos de partida para generar el modelo y las aplicaciones a desarrollar.
En general una TIN tiene una mejor adaptación a los SIG, pero si se pretenden realizar representaciones gráficas del terreno las mallas regulares se imponen por su simple diseño y fácil explotación. En todo caso, siempre existe la posibilidad de generar una malla regular partiendo de una TIN y viceversa cuando se estime necesario.

Points

No.	X	Y	Z
1	429.1	269.6	57.5
2	437.3	200.3	60.2
3	504.7	234.1	55.3
4	607.2	190.5	56.1
5	555.4	265.8	50.2
6	506.7	280.3	52.5
7	621.2	251.4	53.8
⋮	⋮	⋮	⋮

Table 10.4 A List of Triangles

No.	Vertex 1	Vertex 2	Vertex 3
I	1	2	3
II	1	3	5
III	3	4	5
IV	2	4	3
V	1	5	6
VI	4	7	5
⋮			

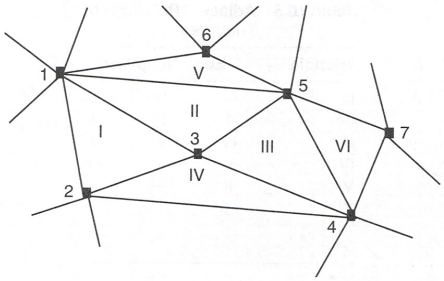


Figura 1. Malla TIN

d) Formato híbrido. A pesar de las ventajas del modelo TIN, menor espacio de almacenamiento y mayor adaptabilidad a terrenos irregulares, entre otras, ha sido cuestionado atendiendo a criterios de adquisición y procesamiento de datos. De ahí que aparezca el formato híbrido de MDT, el cual se basa en la incorporación de líneas de ruptura y puntos singulares en una malla variable. Las líneas de ruptura se capturan interactivamente y se modelan dentro de la malla, intersectando las líneas de la cuadrícula.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de cómo la malla regular puede dar lugar a una mejor percepción visual intuitiva del terreno que el modelo TIN.

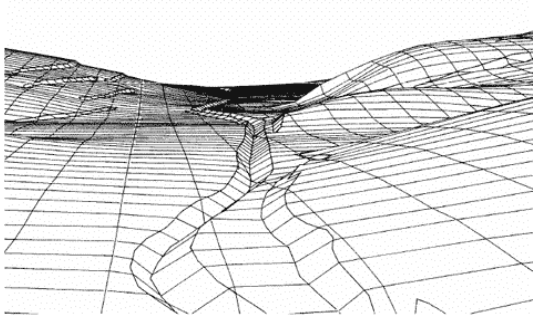


Figura 2. Modelo híbrido: malla regular con líneas de ruptura

Al combinar las líneas de ruptura con malla regular, se obtiene al mismo tiempo la adaptabilidad del TIN y el automatismo y la redundancia de la malla. Además se elimina el problema de los TIN de cómo manejar millones de puntos.

Otras funcionalidades del formato híbrido son las siguientes:

a) filtrado. Estas grandes cantidades de puntos están asociadas a errores aleatorios debidos a la observación y al propio ruido, por lo que tienen que ser filtrados para no superponer los errores aleatorios al MDT derivado y una vez más, problemático para el modelo TIN. Si se utiliza un filtrado por mínimo cuadrados se obtiene un resultado parecido al *krigging* y además una valoración teórica de la precisión del MDT.

Filtrado MDT-MDS. Se trata de definir una función de pesos en función del residuo de cada punto a una superficie inicial interpolada. Se ha aplicado a los datos tomados con LIDAR aerotransportado para separar el terreno de los edificios y la vegetación.

b) Aproximación no lineal. Cuando la superficie es ligeramente curvada, el modelo TIN no se ajusta correctamente al terreno sin hacer una densificación adicional mientras que la interpolación mínimos cuadrados en la malla regular proporciona superficies suavemente curvadas debido a la función covarianza. El software tiene que modificar la función covarianza automáticamente para que no se curven zonas que son llanas.

c) Reducción de datos. Para muchas aplicaciones se necesita un MDT aproximado y las técnicas modernas de captura proporcionan mucha redundancia de datos, por lo que se impone en estos casos una reducción de datos que en el caso del TIN es problemática. En el modelo malla se puede implementar un sistema de capas piramidales usando árboles *quadtree*. Para ello hay que calcular la curvatura en cada punto de la malla y eliminar los que están por debajo de un umbral.

38.1.3. Aplicaciones de los MDT

Las aplicaciones son diversas, siendo las más importantes:

- Su incorporación a un S1G.
- Obtención de altitudes de puntos en un determinado ámbito geográfico
- Representación de perfiles altimétricos.
- Simulaciones del terreno, que es sin duda, una de las aplicaciones más espectaculares.
- Corrección geométrica de imágenes de satélite

(1) $$\text{Columna} = ao + a1\ X + a2\ Y + a3\ Z + a4\ XZ + a5\ YZ$$
$$\text{Fila} = bo + b1\ X + b2\ Y + b3\ Z + b4\ XZ + b5\ YZ$$

- Determinación de características geomorfológicas del terreno (cuencas de drenaje por ejemplo).
- Cálculo de zonas de visibilidad radiomagnética desde un punto (o zonas de intervisibilidad), para ubicaciones óptimas de antenas de telecomunicaciones.
- Cálculo de volúmenes en proyectos de ingeniería civil (presas, carreteras, etc.).
- Combinar un MDT con datos meteorológicos, para análisis medioambientales o planes de protección civil.
- Corrección topográfica de las anomalías gravimétricas, para la determinación del geoide en Geodesia; etc
- Estudios de inundaciones.
- Las principales aplicaciones en fotogrametría digital son los procesos de obtención de ortofotos y en la formación del canevás altimétrico paras su posterior tratamiento en curvas de nivel.

38.2. Obtención por técnicas fotogramétricas digitales

38.2.1. Técnicas para la obtención de MDT

La obtención del MDT en fotogrametría digital se basa en la determinación de paralajes entre imágenes homólogas de un modelo estereoscópico. La tarea de identificación de puntos homólogos de una manera automática siempre fue una idea muy atractiva y hace años se experimentó con equipos de correlación automática instalados en restituidores analógicos (Stereomat Wild B8, etc.), pero ha sido con la fotogrametría digital cuando la correlación automática empieza a considerarse como una alternativa realmente práctica.

No obstante la problemática de la obtención de los MDTs por correlación automática es compleja ya que si consideramos una fotografía aérea (23 x 23 cm) escaneada a 15 micras, esta constará aproximadamente de 2175×10^5 píxeles y para una gama de grises entre 0 - 255 valores, obtendríamos como distribución promedio, en el caso de que todos los valores de grises estuvieran igualmente representados, de 915×10^3 píxeles para cada valor de gris, por lo que no es posible aplicar la correlación píxel a píxel entre dos imágenes homó1ogas.

Además es preciso tener en cuenta una serie de factores que inciden negativamente en la calidad de los resultados, como son:

- Efectos de iluminación. La misma escena obtenida desde dos puntos diferentes, puede causar modificaciones en los valores de intensidad de píxeles homólogos.
- Efectos atmosféricos. Proyección de sombras arrojadas por nubes.
- Escenas homólogas en diferentes imágenes, pueden sufrir distintas deformaciones por desplazamientos debidos al relieve.
- Ocultación de objetos (total o parcialmente) en una de las imágenes.
- Esta problemática ha sido la causa de que añadiendo consideraciones geométricas y radiométricas a las imágenes, se puedan definir algoritmos y estrategias que han llevado a clasificar las técnicas de correlación en dos tipos fundamentales:

    - ABM: Area Based Matching
    - FBM: Feature Based Matching

Donde el término *matching* expresa la correlación entre imágenes digitales, es decir el establecimiento automático de la correspondencia entre escenas homólogas de dos o más imágenes digitales. Se puede definir como aquella técnica que tiene como objeto encontrar automáticamente todos los pares de detalles homólogos de dos o más vistas digitales diferentes de un mismo objeto.

Es preferible hablar de detalles y no de puntos, ya que un detalle no tiene que ser necesariamente puntual y al aplicar la correlación nos basamos en la condición de que dados dos píxeles que son homólogos se verifica que sus píxeles más próximos también serán homólogos.

Aplicando esta técnica podremos reconstruir modelos tridimensionales, medir las marcas fiduciales, hacer la orientación relativa, efectuar la transferencia y medida de puntos para la aerotriangulación y generar MDTs.

Respecto a la forma de búsqueda podemos distinguir dos tipos:

1- AB: Ventanas definidas por niveles de grises. Están basados usualmente en ventanas locales. Los algoritmos de correlación automática realizan la comparación de una pequeña "ventana" (zona alrededor del punto considerado) en la foto izquierda, con las distintas posiciones posibles del punto homólogo en la otra foto, y determinan cual es la posición de mejor ajuste (la de correlación mas alta, es decir, aquella en que ambas ventanas son mas parecidas). El centro de la ventana en esa posición queda identificado como el punto homólogo buscado. Tiene la ventaja de dar garantía a los resultados pero adolece de ser muy sensible a la variación radiométrica de

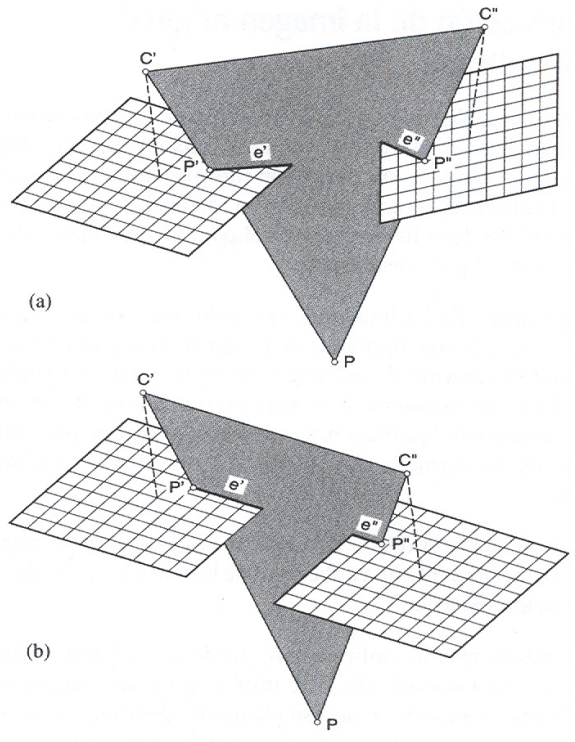
las imágenes en los valores de grises debido a cambios de iluminación, visibilidad, etc. entre las distintas tomas de imágenes.

2- FB: Características extraídas de las imágenes (segmentación) Consiste en considerar las características obtenidas en 'cada imagen individualmente. Las características pueden ser locales como puntos de intersección de detalles lineales o de pequeñas regiones, en cambio las globales comprenden áreas más extensas y descripciones más complejas (estructuras) de la imagen formadas por conjuntos de características locales. Este método tiene la ventaja de que al ser cada característica extraída un conjunto de atributos es invariante a las variaciones radiométricas y geométricas, es decir es muy estable. En cuanto a las desventajas hay que destacar que son más costosos de calcular con el ordenador y es necesario elegir a priori el número de parámetros y características a seleccionar. Con este método el volumen y el número de datos a tratar es muy elevado.

38.2.2. Estrategias

Son varios los criterios que se utilizan y generalmente consisten en definir condiciones geométricas o radiométricas o considerar patrones de búsqueda locales o globales según las características de las imágenes, siendo las estrategias más empleadas las siguientes:

a) Geometría epipolar



Su aplicación es posible cuando las imágenes se han obtenido fotogramétricamente y por lo tanto se puede asumir que geométricamente obedecen a una proyección central.

La geometría epipolar permite convertir la búsqueda de puntos homó1ogos en un proceso unidimensional. Se basa en que todo plano que pase por los dos centros proyectivos de un par fotogramétrico (plano epipolar o plano nuclear) corta a los dos planos focales en dos rectas (rectas epipolares) las cuales tienen la propiedad de que cualquier punto de una de ellas tiene como homólogo un punto situado en la otra.

Figura 3. Geometría epipolar Arriba: modelo original. Abajo: modelo epipolarizado o normalizado

Es decir, que el homólogo de un punto cualquiera de la foto izquierda habrá que buscarlo exclusivamente en la recta de intersección del plano epipolar que pasa por ese punto, con el plano focal en la foto derecha.
Si mediante un artificio matemático conocido como normalización de imágenes consistente en aplicar una transformación a cada imagen se consigue que las líneas epipolares sean paralelas a las filas de píxeles, las búsquedas de píxeles homólogos se hacen a lo largo de una fila, en lugar de buscar en un área. La condición para que las imágenes estén normalizadas es que los ejes de las cámaras sean perpendiculares a la base y además sean coplanarios con ella. Con los 6 parámetros de la orientación exterior y la ecuación de colinealidad se puede calcular una nueva imagen que cumpla las condiciones anteriores.

Se consigue, utilizando la geometría epipolar:

- Simplificar el proceso de cálculo del MDT
- Permitir la visualización perfecta de las imágenes en relieve en la pantalla estereoscópica, sin paralajes 'verticales'.

Esta técnica reduce considerablemente los problemas de ambigüedad y los costes de producción.

b) Relación Jerárquica (Pirámides de imágenes).

Este proceso pretende evitar que el algoritmo se encuentre "perdido" durante el cálculo debido a falsos máximos de correlación, o a que una de las paralajes se salga del intervalo de búsqueda. Para ello se realizan unas imágenes 'resúmenes' de los fotogramas digitalizados iniciales, de resoluciones cada vez menores, en los que cada píxel representa 2x2, 4x4, 8x8, 16~16,... píxeles de la imagen de partida. Dichas imágenes resumidas se utilizan sucesivamente en el proceso de correlación, empezando por las de menor resolución, calculando mallas cada vez más densas, hasta llegar a la malla de densidad deseada, que se calcula con las imágenes 1:1. Por tanto, se va obteniendo una información cada vez más exacta y detallada del relieve de la zona.

La ventaja de este método es que basándose en la cota aproximada de cada punto obtenida con el nivel de la resolución anterior, se restringe al máximo el intervalo de paralajes posibles y por tanto la longitud del segmento en que hay que buscar el punto homólogo cuando se va a refinar dicha cota. Con ello se consigue acelerar el proceso y lo más importante, la probabilidad de encontrar máximos falsos de correlación, es decir falsos puntos homólogos. Además si se produce un error de identificación en un punto, este no arrastrará a todos los puntos a partir de

él, sino sólo a los existentes hasta el siguiente punto de la malla calculado con el nivel de resolución anterior.
Las pirámides de imágenes son métodos usados en muchos algoritmos *matching*. Su finalidad es reducir las ambigüedades que pueden producirse en las ventanas de búsqueda. Su aplicación es más usual en los de tipo ABM.

Las imágenes piramidales son un ejemplo del *espacio escala*. Un espacio escala consiste en una serie de representaciones de una señal, con un rango de resoluciones que varía desde la resolución original a una resolución mínima arbitraria, parametrizada por un factor de escala. A medida que decrece este factor de escala, el nivel de detalle de la señal también se reduce.

Una propiedad muy importante del espacio escala es que no se introducen nuevos detalles a medida que la escala se reduce. Se ha demostrado que el único operador que no introduce falsos detalles es el filtro gausiano y sus derivados. Para el filtro Gausiano, el factor escala es la desviación estándar de la matriz filtro. La imagen filtrada con el operador gausiano todavía tiene el mismo tamaño pero con menos detalle visible. Para formar una imagen piramidal, las imágenes filtradas son sub-remuestreadas después de cada operación de filtrado para reducir el número de píxeles. Debido a que el filtrado ha reducido la información contenida en la imagen, al reducirla no hay pérdida de información.

Esto es así porque la transformada de Fourier de una muestra finita filtrada con el operador gaausiano, sigue siendo finita (y no infinita como ocurre para muestras finitas) y la forma de campana del histograma de una imagen se conserva después de haber sido filtrada dicha imagen con el operador gausiano.
Aunque el filtrado con el operador gausiano es el método mas aceptable, teóricamente, en la práctica, las imágenes piramidales son formadas por un simple suavizado basado en el promedio y después el sub-remuestreo.

38.2.3. Redundancia

Ante lo sofisticado de las estrategias a aplicar es conveniente contar con un exceso de puntos a calcular. Esta probado que una malla más densa no aumenta la precisión en el cálculo de la coordenada z de los vértices del canevás, pero si permite localizar zonas conflictivas y tener una mejor comprensión de la calidad del MDT. Por otra parte el incremento de costes no es significativo dentro de ciertos intervalos de densidad (en la aerotriangulación la toma de nubes de puntos en las zonas de Von Gruber aumenta la precisión y robustez del bloque)

38.3. Precisión y control de calidad de los MDT

38.3.1. Precisión

No existen criterios fijos para la precisión del MDT, sino más bien reglas que evalúan la precisión en función de distintos puntos de vista, como pueden ser los siguientes:

a) En función de la malla. Se estima que para una malla de 5 metros el error medio cuadrático en Z (m_Z) para los puntos interpolados debe ser del orden de 10 a 25 centímetros. Para una malla de 10 a 5 metros de lado el m_Z será del orden de 0.5 a 2.5 metros.

b) En función del terreno. El criterio viene dado por x/K, donde x es el tamaño de la malla y k es un parámetro que depende de la morfología del terreno.

Ejemplo:
x=25 metros y K=10 (terreno accidentado), la precisión será del orden de 25/10 = 2.5 metros
x=25 metros y K=20 (terreno llano), la precisión será del orden de 25/20 = 1.25 metros.

c) Otro criterio es utilizar la tabla de Koppe.

Escala	Eq (m)	σ_h (m)
1:1.000	1	$\pm(0{,}1 + 0{,}3 \text{ tg } \alpha)$
1:5.000	5	$\pm(0{,}4 + 3 \text{ tg } \alpha)$
1:10.000	10	$\pm(1 + 5 \text{ tg } \alpha)$
1:25.000	10	$\pm(1 + 7 \text{ tg } \alpha)$
1:50.000	20	$\pm(1{,}5 + 10 \text{ tg } \alpha)$

valores de σ_h, para pendientes de 10° y 30° se expresan en la siguiente tabla:

Escala	Eq (m)	σ_h ($\pm$m)	
		$\alpha = 10°$	$\alpha = 30°$
1:1.000	1	0,15	0,25
1:5.000	5	0,87	1,93
1:10.000	10	1,79	3,55
1:25.000	10	2,11	4,57
1:50.000	20	3,08	6,59

Tabla 1. Tabla de Koppe

d) Cuando el MDT se ha obtenido por procedimientos fotogramétricos estereoscópicos, se expresa la precisión de la siguiente forma:

$$\sigma = ((\alpha * d)^2 + const.^2)^{1/2} \quad (2)$$

donde:

α es un coeficiente que depende del tipo de terreno

d es la media aritmética de las distancias de un punto interpolado a los puntos más próximos de la malla

$const$ es el error constante (sistemático) que depende de H (altura de vuelo) y donde $const$ vale de 0.05 a 0.1 ‰ H

Esta fórmula permite estimar la densidad de puntos necesarios como datos de partida, en función de un determinado tipo de terreno y para una determinada altura de vuelo H, si se quiere obtener un MDT con una determinada precisión σ .

e) Fórmulas empíricas de Karel y Kraus

En el caso de la estereofotogrametria :

$$\sigma_H = (0.00015 * H + \frac{0.15}{f} H \tan\alpha) \quad (3)$$

con f= focal y H=altura de vuelo.

Ej: H=1500m, f=150mm pendiente del terreno=10%

$\sigma_H = 0.22 + 1.5 \cdot 0.1 = \pm 0.37m$ en terreno abierto y $\pm 2.4m$ en zonas de bosque.

En el caso del LIDAR:

$$\sigma_H = [cm] = \pm(\frac{6}{\sqrt{n}} + 50 \tan\alpha) \quad (4)$$

Con n= densidad de puntos por metro cuadrado. La altura de vuelo no influye en la precisión, en cambio la densidad de puntos es un factor crítico.

Ej: Espaciado de puntos = 2m = 0.25 puntos / mc, pendiente = 10%

$$\sigma_H = \pm\left(\frac{6}{\sqrt{0.25}} + 50 \cdot 0.1\right) = \pm 17cm$$ en terreno abierto con un 100% de penetración

$$\sigma_H = \pm\left(\frac{6}{\sqrt{0.0625}} + 50 \cdot 0.1\right) = \pm 29cm$$ en terreno de arbolado con un 25% de penetración.

Las constantes de las fórmulas 6 y 50 fueron ajustadas a partir de las diferencias entre el MDE y 22.000 puntos de chequeo, clasificando los residuos por pendientes.

Además, se han desarrollado métodos estadísticos de testeo para obtener un parámetro que indique la precisión. El parámetro más común se basa en la diferencia entre el MDE y otro MDE de referencia.

La superficie descrita por el MDE, z' = f ' (x, y), sólo es una aproximación al terreno real, definido por z=f(x,y) . El error del MDE es la diferencia entre estas dos superficies: $\Delta z = z - z'$

Y la varianza del MDE se define como:

(5) $$\sigma^2 = \frac{1}{mX * mY} \int_0^{mx} \int_0^{ny} \Delta z(x, y) dxdy$$

Pero en la práctica no puede ser calculada porque no se conoce la superficie real. Se recurre a la diferencia entre el MDE objeto y un MDT obtenido por métodos más precisos o a las diferencias en altitud entre el MDE objeto y los puntos de chequeo:

(6) $$e.m.c. = RMSE = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_i')^2}{n}}$$

Este estimador de la varianza conocido como error medio cuadrático es el parámetro dominante en los informes de precisión. Sin embargo, no es el parámetro más apropiado, tiene muchos problemas: el primero es que se da por hecho que ese error es igual en cualquier zona del MDT y no tiene por que ser así y el segundo es que se está asumiendo que no hay errores sistemáticos y sin embargo pueden estar camuflados dentro del emc. Por tanto, como el RMSE no es un estimador bueno de la precisión se puede recurre al siguiente test de hipótesis:

Una medida de la calidad sólo se puede tener a partir del análisis de las diferencias del MDE con otro MDE de referencia. Asumiendo que los dos MDE tienen el mismo número de filas y

columnas, la diferencia entre ellos se calcula según: $\Delta Z = Z_{MDE} - Z_{Mref}$ La varianza de ΔZ se define como:

$$\sigma^2{}_{\Delta Z} = \frac{1}{f * c}\sum_{i=1}^{f}\sum_{j=1}^{c}(\Delta Z_{i,j} - xs)^2 \quad (7)$$

donde xs es la diferencia media entre los dos MDE comparados: $xs = \frac{1}{f * c}\sum_{i=1}^{f}\sum_{j=1}^{c}\Delta Z_{ij}$

El valor de xs corresponde al error promedio si uno de los dos MDEs hace el papel de puntos de chequeo.

Suponiendo que queramos saber si en el área de test el error medio *m* del MDE es igual al valor asumido para ese error m_0. Se tiene, por otra parte, una gran muestra de diferencia entre las elevaciones del MDE y los puntos de chequeo, se realiza une test de hipótesis.

Para empezar, el teorema del límite central nos dice que cuanto mas grande es el tamaño de la muestra, *n*, mas se aproxima la distribución de media *xs* a una distribución normal, por lo que podemos tomar la distribución como normal. Ahora hay que definir los elementos del test de hipótesis.

a) La hipótesis nula, Ho es: $m = m_0$

b) La hipótesis alternativa, Ha es: $m > m_0$

c) El estadístico usado para decidir si se acepta o rechaza la hipótesis nula es: $u = \frac{xs - m_o}{\sigma_{XS}}$

Donde $\sigma_{XS} = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} \approx \frac{s}{\sqrt{n}}$

d) La región de rechazo es: $u > u_\alpha$

siendo α el nivel de significancia (ej 99.5%) y u_α es elegido tal que la probabilidad $P(u > u_\alpha) = \alpha$

Si el valor numérico del estadístico del test cae dentro de la región de rechazo se rechaza la hipótesis nula y se toma por verdadera la hipótesis alternativa. Este test se equivoca solo el (100 - α)% de las veces que Ho es cierta. Si el test cae fuera de la región de rechazo se puede concluir que no hay suficiente evidencia para rechazar Ho con un nivel α de significancia.

La conclusión es que expresar la precisión por el emc o RMS es engañosa y es preferible expresarla por la media y la desviación de las diferencias. Por ejemplo: si la media es pequeña y la desviación es grande indica que hay grandes diferencias y con distintos signos, pues se compensan en la media. Si la media es grande y la desviación es pequeña es porque los datos están afectados de un error sistemático. Corrigiendo el error sistemático se obtiene la calidad.

38.3.2. Calidad

El concepto de calidad de un MDT es más importante que el concepto de precisión, ya que la calidad además de implicar la descripción morfológica del terreno, añade los conceptos de consistencia, confianza y uniformidad.
No hay criterios objetivos para evaluar la calidad de un MDT, sino que se definen los criterios en función de su uso posterior (ortofoto, curvado, etc.), pero en términos generales la calidad de un modelo digital se mide por la precisión de la información de partida o fase de medida, por el proceso de estimación o modelización empleado y por la adaptación del resultado obtenido al fenómeno representado dentro de un determinado nivel de detalle.

La calidad final del MDT depende de varios factores como son la topografía del terreno, las características de las imágenes, si se ha obtenido por correlación, y finalmente del algoritmo o técnica de modelización empleada. Los problemas se acrecientan cuando el terreno es muy accidentado, los desniveles son muy grandes, o hay grandes zonas sin detalles "correlables" (bosques cerrados, sombras, etc.). En general, en las zonas de montaña las dificultades aumentan considerablemente y en estas zonas para evitar las sombras (imágenes saturadas de negro) o de luces excesivas (saturadas de blanco) es importante partir de unos fotogramas de la máxima calidad fotográfica y no demasiado contrastados.

Las consideraciones prácticas sobre la calidad son las siguientes: no hay unas especificaciones de calidad adoptadas o aceptadas internacionalmente para los MDE. Se habla de calidad para un cierto propósito, sin embargo, hay unos criterios para decir lo que es “calidad” en términos de datos espaciales digitales:

- la completitud (¿los datos son suficientes para representar el relieve?)
- la fiabilidad (¿puede haber errores groseros no detectados?, ¿se han rechazado puntos que podrían ser válidos?)
- la adecuación (¿es apropiado el paso de malla o tiene que ser más fino?)
- la uniformidad, (¿se ha trabajado con los mismos parámetros de precisión en todos los fotogramas?)
- la satisfacción (¿da una buena representación intuitiva del terreno?), la precisión (la altitud de un punto tiene RMS error medio cuadrático).

Estos requerimientos varían según el fin que tengan esos datos y las condiciones en las que van a ser usados.
Los factores que pueden afectar la calidad del MDE son los siguientes:

- la calidad de las imágenes,
- la calidad de la aerotriangulación y el apoyo de campo
- los algoritmos de correlación utilizados en el software
- el tipo de superficie, que incluye la variación de las pendientes y el uso del suelo,
- el espaciado de malla elegido para representar el terreno
- la consistencia y eficacia del operador de correlación automática.

Se dan requerimientos de calidad según la tarea, por ejemplo, para dibujar curvas de nivel a escala 1:25000, el error no deba sobrepasar el cuarto de la equidistancia, +/- 2.5 m con equidistancia de 10m.

También está aceptado que cuanto mas fino sea el paso de malla (mayor resolución) la precisión del MDE es mayor, y no hay que confundir la precisión de un punto correlado, que puede ser buena o mala pero independiente del paso de malla con la precisión global del MDE que si depende del paso de malla.

Se ha sugerido (Ackerman, 1996) que como regla general para fijar el paso de malla, éste debería ser tal que la precisión buscada en Z fuese alrededor de 1/20 (en terreno llano) o un 1/10 en terreno abrupto, del paso de malla. Para obtener una precisión de entre +/-0.25 m y +/-0.5 m la malla debe ser de 5 m.

La adecuación o fidelidad con la que un paso de malla dado representa el terreno, es otra consideración a tener en cuenta.

38.3.3. Control de calidad

Actualmente, los MDE han llegado a ser un producto cartográfico o geoespacial estándar. Pueden ser usados en ingeniería civil, topografía y cartografía, gestión del suelo, y muchos otros campos más. Las ortofotos son generadas a partir de un simple fotograma con su orientación y un MDT. Por todo ello, los MDE tienen que tener la precisión requerida por los usuarios.

Los MDE existentes pueden ser buenos para algunas aplicaciones pero como la demanda de mayor calidad y mayor resolución sigue creciendo, no pueden alcanzar los requerimientos debido a los errores introducidos por la fuente de datos y el método de producción. Por otro lado, el relieve del terreno cambia por la erosión natural y por la actividad humana. Estos cambios deberían estar reflejados en los MDE y los usuarios deberían disponer de herramientas que verifiquen si se cumplen los requerimientos de exactitud y precisión de acuerdo a sus necesidades.

Los MDE son generados por diferentes vías: a partir de curvas de nivel de cartografía existente, a partir de la correlación automática de puntos homólogos en modelos estereoscópicos, a partir del escaneado del terreno LIDAR aerotransportado. Las organizaciones nacionales de cartografía suelen describir la calidad de los MDE ofrecidos por la descripción de las fuentes de datos, la resolución o paso de malla, la densidad de puntos por metro cuadrado y el error medio cuadrático (RMSE) pero el conocimiento de estos parámetros es insuficiente para determinar si satisface las necesidades del usuario. Por ello se han desarrollado algoritmos estadísticos para determinar la precisión del MDE.

Primero hay un control de calidad durante el proceso de adquisición, para corregir los errores inmediatamente. Son métodos que dan una idea intuitiva de la calidad o bien sirven para detectar errores groseros, pero no dan un parámetro estimativo de la precisión. Este parámetro se obtiene por métodos estadísticos después de haber editado y depurado el MDE.

Estos métodos no paramétricos son los siguientes:

a) **Superimposición de las curvas de nivel** sobre el modelo estereoscópico. Se aplica on-line para verificar si hay alguna inconsistencia entre el relieve estereoscópico y las curvas. Las curvas son generadas automáticamente a partir de la malla de puntos correlados según una equidistancia fijada. Si se detecta alguna inconsistencia, por ejemplo, una vaguada ha sido sustituida por un plano inclinado, es señal de que hay errores groseros y en ese caso habrá que volver a generar la malla de puntos. También pueden superponerse las curvas de nivel sobre las ortofotos u otra cartografía. Si se aprecia gran diferencia en las plataformas o en las elevaciones de los puntos, otra vez habrá que remedir la malla. Estos métodos se aplican sólo para detectar errores groseros.

b) **El estereomodelo cero**. Una alternativa es comparar las dos ortofotos generadas una con el fotograma izquierdo y la otra con el fotograma derecho. Las dos ortofotos tienen que haberse generado con el mismo MDT. Se obtiene en ese caso un par estereoscópico sin paralajes, es el llamado Zero Stereo Model. Sólo aparecerán paralajes en árboles, edificios, objetos tridimensionales y donde haya errores. En caso de existir paralajes, puede ser debido a que algún error en los parámetros de orientación introduce inconsistencia en la ortofoto, a que pueda estarse haciendo algo incorrecto al montar el par de ortofotos y a que el MDT tenga errores. Si se excluyen las dos primeras posibilidades, el paralaje que aparece en el ortopar, es el reflejo directo de los errores en el MDT.

c) **Análisis de superficies de tendencia**. Muchos terrenos siguen ciertas tendencias naturales de cambio y la forma de esas tendencias puede variar con la génesis del terreno. Los cambios del terreno pueden ser descritos matemáticamente por superficies de tendencia. Un análisis de superficies de tendencia típico revela grandes desviaciones respecto de la tendencia general y los errores groseros se manifiestan si se encuentran grandes desviaciones respecto de la tendencia.

Una superficie de tendencia típica es dada por un polinomio de segundo orden cuando el terreno es cóncavo o convexo o tercer orden cuando hay líneas de inflexión. Grados mas altos se descartan pues los polinomios de orden 4 y superiores tienen un comportamiento muy inestable.

$$Z(x,y) = \sum_{k=0}^{j} \sum_{i=0}^{k} a_{ki} x^{k-i} y^{i}, j = 1,3 \quad (8)$$

Los parámetros a_{ki} pueden obtenerse por mínimos cuadrados y el número de términos se elige dependiendo de la complejidad del terreno. El punto crítico es la elección de un umbral para decidir si un punto tiene o no tiene error grosero. En la práctica, un valor de tres veces la desviación estándar es un umbral muy realista sin embargo, en terrenos abruptos y con puntos distribuidos irregularmente, no tiene por que ser un punto incorrecto el que sobrepase el umbral ya que los polinomios de alto orden son muy inestables.

d) **Vistas tridimensionales**. El cuarto método es la creación de una superficie 3D a partir de los datos del MDT para una inspección visual interactiva. Así se detectan puntos absurdos que han de ser eliminados de los datos originales. Para construir una vista 3D, se recomienda utilizar la malla de alambre no transparente, para que no se empasten las líneas vistas y ocultas.

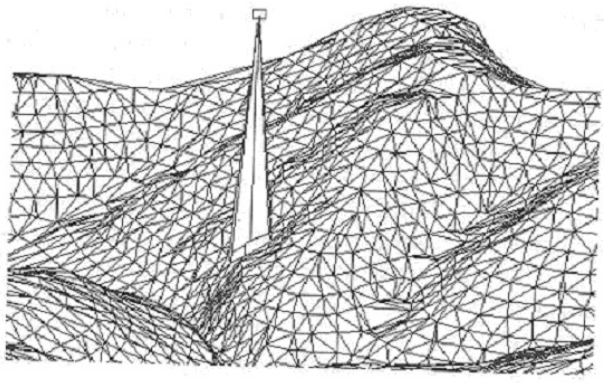


Figura 4. Vista tridimensional de la malla de alambre y detección de un error grosero

Los picos y los pozos indican que se han asignado mal los valores de altitud. Aunque tal inspección es intuitiva, los resultados son muy fiables. Una variación del método anterior es generar un sombreado a partir del MDT. Los posibles errores groseros aparecen como manchas negras contrastando con el entorno. Además de pozos y picos se pueden detectar patrones erróneos de correlación y también la aparición de falsos triángulos. No se debería validar un

MDT sin haber realizado antes un examen visual en el curvado sombreado generado. Una diferencia entre las vistas 3D en malla de alambre y los sombreados es que con un solo sombreado se puede inspeccionar todo el MDT mientras que con la malla de alambre se necesitan más de un punto de vista o ángulo de encuadre distintos.

e) **Filtros**. **Suavizado**. El error final en las altitudes resultado de diferentes tipos de error y mediante técnicas de filtrado se pueden eliminar algunos de estos errores y así mejorar la calidad. Un conjunto de datos tiene tres componentes: las variaciones regionales, las variaciones locales y el ruido aleatorio. En los MDT la primera es la más importante pues define la forma del terreno, la importancia de la segunda depende de la escala de representación de los productos derivados del MDT, por ejemplo: en un mapa con curvas de nivel, si la escala es grande, las variaciones locales son importantes, si la escala es pequeña estas variaciones pueden verse como ruido aleatorio pues no se busca una información detallada. La tercera componente siempre es importante pues distorsiona la apariencia real de las variaciones regionales y locales.

Esta tercera componente o ruido aleatorio se puede separar del resto de la información con un filtro de suavizado o paso bajo. Pero si se suavizan los datos, ya no son los datos originales. La cuestión es ¿cuando debería aplicarse el filtro de suavizado? o ¿bajo que circunstancias es necesario aplicar el filtrado? La respuesta todavía es discutida. La magnitud de los errores aleatorios debe ser tomada en consideración. A partir de numerosas publicaciones se puede tomar como RMS en altura el valor: 0.05/º º H , es decir, 5 cm por kilómetro de altura de vuelo. Por lo que la respuesta a las preguntas anteriores podría ser: cuando la pérdida de información resultante de un proceso de selección y reconstrucción y generalización) supera el valor anterior, el filtrado no es necesario. En otro caso, el ruido aleatorio es una parte importante del error total y debe ser filtrado.

f) **Filtros. Detección de errores groseros**. Otra posibilidad para mejorar la calidad detectando errores groseros es utilizar el filtro de mediana. Este filtro toma los valores vecinos y los ordena de menor a mayor. El valor central de esa lista es la mediana y se asigna al punto.

$$Z_{salida}(col, fil) = Z(col, fil) - M_{ediana} \tag{9}$$

De esta forma se construye un modelo de medianas. Los valores son parecidos a los valores originales excepto en los puntos con error grosero, que será un valor parecido a los vecinos. Si ahora se resta al modelo original el modelo de medianas, muchos valores serán próximos a cero pero en los puntos con error grosero el valor será grande.

Otra variación para detectar errores es utilizar el promedio de los 8 vecinos a diferencia del suavizado que utiliza el promedio de 9, (los 8 vecinos y el propio). Si la diferencia del valor original con los 8 vecinos sobrepasa un umbral, se le asigna el valor del promedio.

(10) $\| h * MDT - MDf \| > umbral$, con $h = \frac{1}{8}\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$, siendo * el símbolo de la convolución.

El modelo de diferencias se puede curvar visualizar mediante un curvado, las líneas estructurales del terreno y las zonas con errores groseros son enfatizadas. De esta forma se conoce donde hay que ir a remedir datos.

En la práctica hay que hacer un densificación del MDT con el interpolado Krigging y con un paso de malla 1/10 veces inferior al original.

38.4. Corrección y edición interactiva. Obtención de curvas de nivel

Como es inevitable que se produzcan errores, al final del cálculo aparecerán siempre algunos puntos o zonas en las que la malla no estará "posada" en el terreno, siendo necesarias la revisión y corrección interactiva de estas zonas. Esta fase consume una gran cantidad de tiempo de operador y de consola interactiva en comparación con el resto de los procesos, que son casi totalmente automáticos, además las herramientas de depuración son bastante difíciles de implementar y suelen ser el punto débil en los sistemas de correlación automática. Para detectar y corregir estas zonas erróneas un método consiste en la visualización estereoscópica de la malla superpuesta al modelo estereoscópico o bien obtener por interpolación en el MDT las cotas de varios puntos de altitud conocida y comparar los resultados.

Una vez obtenido el modelo digital del terreno, una de las posibles aplicaciones es la obtención de las curvas de nivel, para lo cual hay que hacer las siguientes consideraciones:

- El MDT requiere ser depurado previamente, pues de lo contrario aparecerán toda una serie de cotas aisladas y singularidades que no representan la realidad de la morfología del terreno.
- La introducción de líneas de vaguada (*break-lines)* podría mejorar la forma de las curvas de nivel haciendo que estas se adaptasen planimétricamente a dichas líneas.
- La influencia del paso de malla sobre la forma de las curvas es muy grande, siendo estas más suaves a medida que el paso de malla aumenta.

Por último conviene destacar que para las ortofotos no se requiere una gran precisión en el MDT y en este caso si que pueden ser calculados automáticamente de una forma rutinaria.

38.4.1. Proceso y post proceso

Para comenzar el proceso de extracción automática del MDT, primero hay que configurar el proyecto de trabajo. Habrá que seleccionar sobre las imágenes la zona de interés marcando un rectángulo sobre el canevás del proyecto introduciendo las coordenadas máxima y mínima. La zona será parte de una fotografía o podrá ocupar muchas fotografías. También hay que fijar manualmente el espaciado de la malla.

Hay dos estrategias para asistir el proceso de correlación, las cuales indican al proceso de correlación el grado de pendiente que no debe sobrepasar:

- Extracción del terreno automática adaptativa (AATE), esta estrategia usa una combinación de estrategias menores: terreno llano, terreno montañoso, terreno escarpado... , o una estrategia común que permita al sistema decidir cual tomar. Este método adaptativo permite un proceso de suavizado de lata, media o baja precisión. También hay un proceso adicional de filtrado para eliminar edificios y árboles.
- Extracción automática del terreno no adaptativa (ATE) que permite elegir una sola de las estrategias anteriores. No permite el proceso de filtrado.

Un buen software debería ser capaz de ofrecer una salida TIN o una salida malla regular.
Todos estos parámetros son guardados junto con el nombre del nuevo MDT y el proceso comienza a ejecutarse. El proceso puede lanzarse en modo batch y así aprovechar la noche para que el ordenador trabaje.
A continuación viene un proceso de edición interactiva, pues habrá muchos puntos mal correlados, puntos en la copa de los árboles que habrá que bajar al terreno, habrá tejados y también hay que bajar la cota al terreno. Para revisar y editar el MDT, el software debe disponer de las siguientes herramientas:
- Una utilidad que plotee en pantalla el MDT obtenido, bien como nube de puntos o bien como curvas de nivel y a continuación lance una rutina de suavizado basada en la comparación de la altitud de un punto con los adyacentes. El suavizado es repetido hasta que la representación 3D del MDT refleja el terreno sobre el que está superimpuesto y ya se puede pasar a la edición manual, examinando toda la superficie que ocupa el MDT, sección a sección y aprovechando todo el nivel de zoom que el sistema proporciona.
- Un editor por área que cambie todos los puntos dentro de una zona definida por un polígono.
- Un editor geomorfológico que añada información adicional de alturas, según la geomorfología del terreno, y modifique las alturas de los puntos.

- Un editor que permita subir o bajar cada punto individualmente.

Finalmente, el MDT editado y corregido es exportado a un formato ASCII

La correlación de imágenes es hoy día una técnica estándar para identificar puntos homólogos en grandes cantidades de imágenes. El algoritmo que se utiliza para la obtención de MDT por correlación es el ATEl método adaptativo (ATE) combina los métodos basados en área con los métodos basados en características. El algoritmo ATE tiene una aproximación recursiva para determinar la paralaje entre dos imágenes.

Bibliografía

[1] Digital Terrain Modeling, principles and methodology. Por Zhilin Li, Quing Zhu and Christopher Gold CRC PRESS

[2] Digital Elevation Model Technologies and Applications. Thr DEM Users Manual. Publicado por la ASPRS

[3] OEEPE workshop on Automation in digital photogrammetric production. Modern Photogrammetry por: Edward M. Mikhail, James S. Bethel y J. Chris McGlone. De la editorial Jhon Wiley & Sons, Inc.

[4] EUROSDR nº 51 por: Zygmunt Pasota, Malgorzata Szumilo y por: T. Jancso y J Zavoti

[5] Apuntes de fotogrametría digital de F.J. Hermosilla y S. López Cuervo.

Tema 39. Ortofoto digital: Concepto y fundamentos matemáticos. Calidad y precisión de la ortofoto. Modelos Digitales de Superficie. Ortofotos verdaderas. Edición y mosaicos de ortofotos.

39.1. Ortofoto digital: Concepto y fundamentos matemáticos

39.1.1. Introducción

Una ortofoto contiene la riqueza informativa de una foto con la métrica convencional de un mapa o plano. Para ello es necesario corregir en la foto original los desplazamientos debidos a la inclinación del eje óptico de la cámara en el momento de la toma (rectificación) y el desplazamiento radial debido al relieve de la superficie topográfica fotografiada.

Por lo tanto, una ortofoto es una mapa hecho a partir de fotos, de manera que todos los detalles naturales o artificiales comprendidos en el terreno están en una perfecta posición planimétrica (x, y) con arreglo a la proyección empleada en la representación.

La idea de conseguir en una foto aérea eliminar de alguna manera las deformaciones debidas a la inclinación del eje óptico y al relieve es muy antigua. Lo primero que se fabricaron fueron unos instrumentos muy sencillos llamados "rectificadores" que permitían corregir los efectos de la perspectiva debidos a la falta de verticalidad del eje de toma utilizando tres "puntos de control", en terreno llano el procedimiento anterior era perfecto, pero en terreno ondulado se hace necesario corregir también los desplazamientos debidos al relieve y para esto se crearon unos instrumentos llamados "ortoproyectores", basados en restituidores fotogramétricos analógicos y posteriormente en los analíticos.

Pero ha sido con la fotogrametría digital con la que la producción de ortofotos ha cobrado gran importancia, de hecho hasta ahora la fotogrametría digital ha estado más enfocada a la creación de ortofotos y actualmente hay que reconocer que la mayoría de los sistemas digitales se están utilizando para su producción mediante un proceso rutinario debido a su simplicidad.

Esto ha hecho que sea la tarea fotogramétrica más extendida actualmente y las series cartográficas más utilizadas hoy en día son las ortofotos como complemento a los mapas de línea en zonas o países muy desarrollados y como cartografía básica en aquellas zonas mas desfavorecidas.

Para la confección de ortofotos digitales a escala 25.000 o mayor se han utilizado fotos convencionales e imágenes de satélite para escalas inferiores al 25.000, no obstante todo esto es orientativo dado el continuo desarrollo de la información procedente de vehículos espaciales.

Teniendo en cuenta que la confección de un mosaico de ortofotos a partir de fotos aéreas es más difícil que cuando las imágenes proceden de satélites, ya que debido a la gran apertura de campo y a las características ópticas del objetivo se producen modificaciones en la radiometría de los píxeles en función del ángulo que forma cada rayo incidente respecto al eje óptico.

Si se trata de ortofotos en color, las dificultades de la homogeneización radiométrica se acrecientan considerablemente.
La disponibilidad cada vez más frecuente del MDT ha permitido trabajos de actualización y puesta al día a partir de métodos monoscópicos empleando ortofotos como fuente de información así como la posibilidad de integrar ortofotos digitales en los SIG

Las ventajas de la ortoproyección digital sobre la ana1ógica tradicional son múltiples, y entre ellas podemos citar:

- Mejora en la calidad de la imagen del producto resultante gracias a la eliminación del complicado proceso óptico de los equipos ana1ógicos y su sustitución por las estaciones fotogramétricas de imágenes digitales.
- Mayor facilidad para el tratamiento de las fotografías en color
- Posibilidad de realización de mosaicos digitalmente.

39.1.2. Ortoproyección de imágenes digitales

Hay dos estrategias posibles para generar las ortofotos. En los dos casos se necesita una imagen con su orientación interna conocida (OI): $f, x_{o,} y_o$, con la orientación externa conocida (OE): $X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa$ y con un MDT conocido. También, en los dos casos, se define una ortofoto sin colores, por sus dimensiones resolución. Se trata de encontrar el color de cada píxel.

a) Orto - MDT - Imagen

Los pasos a seguir son los siguientes:

Un pixel de la orto sin colores, con coordenadas X,Y se proyecta sobre el MDT para tener X,Y,Z.

El punto X,Y,Z se proyecta sobre la imagen orientada (OE) con la ecuación de colinealidad

directa y se obtiene la posición correspondiente x, y en la imagen

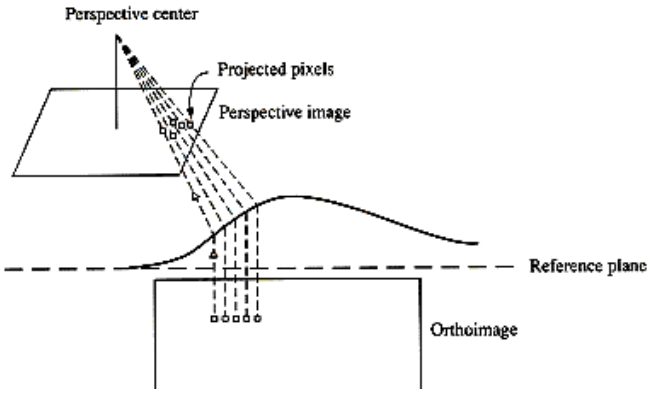


Figura 1. Orto - MDT-Imagen Los pixeles de la orto, sin nivel digital, se llevan a la imagen para obtenerlo por interpolación.

(1)

$$x = x_o - f\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_o - f\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Con la Orientación Interior se convierten las fotocoordenadas x,y a coordenadas píxel y así puede obtenerse el nivel de color que le corresponde al píxel sin colorear de la ortofoto. En realidad se toman los píxeles vecinos a x, y para hacer una interpolación bilineal si se toman cuatro píxeles, o bicúbica si se toman 16 o simplemente se toma el vecino más próximo.

Así se obtiene el color del primer píxel de la ortofoto. El resto se obtiene incrementando X,Y, y repitiendo todo el proceso .

b) Imagen – MDT - Orto

Se procede a la inversa. Cada píxel de la imagen con su color, con coordenadas x,y se proyecta sobre el MDT con las ecuaciones de colinealidad inversa.

(2)
$$X = X_o + (Z - Z_0)\frac{r_{11}(x - x_o) + r_{12}(y - y_o) - r_{13}f}{r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) - r_{33}f)}$$

$$Y = Y_o + (Z - Z_0)\frac{r_{21}(x - x_o) + r_{22}(y - y_o) - r_{23}f}{r_{31}(x - x_o) + r_{32}(y - y_o) - r_{33}f)}$$

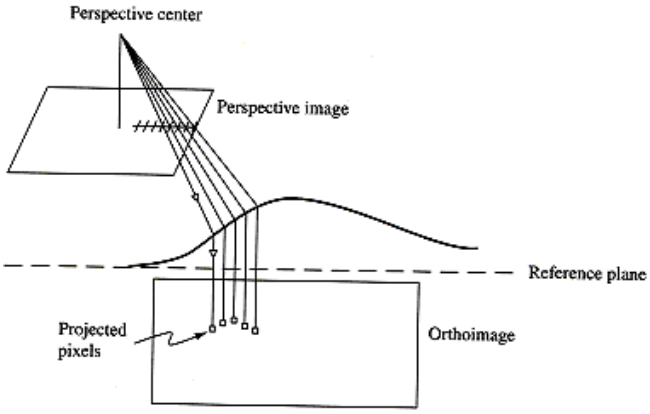


Figura 2. Imagen – MDT – Orto Los píxeles imagen se ortoproyectan uno a uno, pasando por el mdt

Hay que resolver el sistema por iteraciones: Con una Z media del terreno, ya puede obtenerse una posición aproximada X,Y. Esas coordenadas aproximadas se interpolan en el MDT y se obtiene una Z mejor. Con esa Z mejorada se entra otra de nuevo en las ecuaciones de colinealidad y se obtiene otra posición X,Y mejorada, con la que puede interpolarse otra vez en el MDT para corregir y mejorar un poco mas la Z. Y otra vez a la colinealidad hasta que la diferencia entre las coordenadas con las de la iteración anterior sean menores de un umbral.

Las coordenadas XY finales son coordenadas ortofoto, con un color conocido. Ya se podría colorear la foto, pero hay que hacer una interpolación por el vecino más próximo, bilineal o bicúbica porque los píxeles de la imagen no forman una cuadrícula al proyectarlos sobre la ortofoto, pudiendo haber píxeles en la ortofoto sin color. La malla regular de la imagen se proyecta como una malla irregular sobre la ortofoto, por eso hay que interpolar.

La ortoproyección básicamente consiste en deformar la imagen original que es una perspectiva procedente de una proyección central para eliminar las diferencias que existen entre esta perspectiva y la proyección ortogonal de la superficie topográfica terrestre sobre el plano de referencia utilizado en una determinada proyección cartográfica.

La corrección vendrá dada por una transformación bidimensional R entre la imagen original (foto) y la imagen corregida (ortofoto) la cual ya está perfectamente georeferenciada en el plano de proyección, aunque en la práctica se utiliza la transformación inversa $T=R^{-1}$ que transforma cada punto de coordenadas terreno (X;Y) en una determinada proyección cartográfica, en un punto de coordenadas (x,y) en la foto original y además que estará cuantificado con un cierto valor de gris, es decir:

(3) $$R^{-1} = T(X;Y) = (x,y)$$

La transformación T viene determinada en base al modelo matemático (transformación P) que describe la relación fotogramétrica entre un punto de la superficie topográfica de coordenadas terreno (X,Y,Z) y el sensor (foto). Es decir:

(4) $$P(X,Y,Z) = (x,y)$$

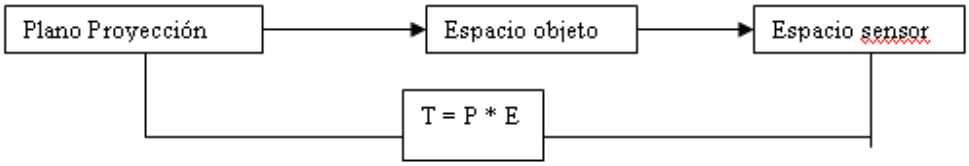
Siendo las ecuaciones de colinealidad las expresiones matemáticas de la función anterior.

Tenemos entre la ortofoto y la foto las siguientes relaciones:

$T(X,Y) = (x,y)$

$P(X,Y,Z) = (x,y)$ donde: $T = P * E$, siendo E la altimetría que viene dada por el MDT.

Es decir:



En el caso de obtención ortofotos digitales, dado que las imágenes digitales son inherentemente discretas al aplicar una transformación geométrica o analítica sobre la imagen original (foto) el resultado es otra imagen destino (ortofoto) y en esta última los nuevos píxeles (transformados de los originales) ya no se corresponderán con valores enteros debido a la transformación, sino que tendrán valores intermedios.

La rectificación diferencial digital tiene como objeto la transformación de la matriz de coordenadas imagen en otra matriz referida al sistema de coordenadas del terreno.

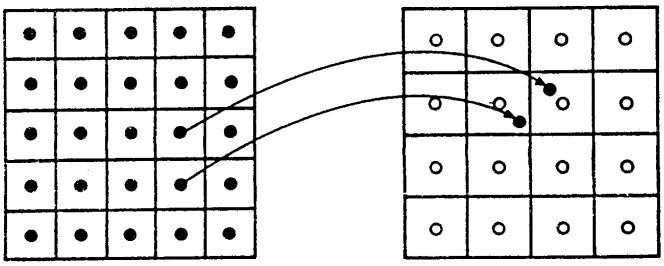


Figura 3. Rectificación diferencial digital

La resolución del problema consiste en:

1 Determinar las coordenadas de cada píxel (i,j) de la imagen original en la imagen destino (i´,j´) y en general este valor de (i´,j´) no será un valor entero debido a la transformación geométrica o analítica.

2 Calcular los valores de los píxeles (i´,j´) de la imagen destino a partir de los valores conocidos de los píxeles (i,j) en la imagen original mediante un proceso de interpolación.

Consecuentemente cuando queremos obtener a partir de una foto aérea (imagen original) su ortofoto (imagen destino), necesitamos:

- Los parámetros de Orientación Interna y Externa de las fotos aéreas.

- El modelo digital del terreno (MDT) de la zona a ortoproyectar

Además tenemos que introducir los siguientes datos:

- Tamaño píxel de la ortofoto, expresado en coordenadas terreno (resolución geométrica)

- Método de interpolación que nos dará el valor de gris correspondiente a cada píxel (resolución radiométrica)

Vamos a ver como se realizan dichas operaciones.

- Dado un punto P en la ortofoto de coordenadas (X,Y) en el plano de proyección, podemos obtener Z = Z(X,Y) utilizando el MDT , de esta manera obtenemos las tres coordenadas (X,Y,Z) del punto P .

- A continuación aplicando las ecuaciones de colinealidad directas (ver ecuación 1) obtenemos las fotocoordenadas (x,y).

Y donde: (X,Y,Z) son las coordenadas terreno del punto P (X_0, Y_0, Z_0) son las coordenadas del centro de proyección y rij son los elementos angulares de la orientación externa, c es la distancia focal de la cámara métrica utilizada

- Obtenidas las fotocoordenadas (x,y) que estarán referidas al sistema de referencia definido por las marcas fiduciales, podemos pasar al sistema de referencia de la imagen digital mediante la correspon-diente transformación bidimensional que nos relaciona la situación de cada píxel en la imagen digital con el sistema de referencia fiducial en la foto y cuyos valores de la transformación son obtenidos por las lecturas de las marcas fiduciales necesarias para hacer la orientación interna de la imagen digital.

- Dado que los valores obtenidos no serán enteros procederemos al proceso de interpolación para obtener los valores de la escala de grises. En la transformación de la matriz de la imagen a la matriz reordenada de la ortofoto se originan desplazamientos y deformaciones en los píxeles primitivos y consecuentemente se precisa una nueva definición matricial, en la cual es necesario asignar a cada píxel una nueva intensidad de grises. Los procedimientos usuales en este tipo de operaciones son:

  - Por el punto más próximo. Asigna el valor de gris del píxel más cercano de la imagen original. Es la función más rápida, aunque no se respetan los valores de transición.
  - Por interpolación bilineal. Calcula un promedio de intensidad con los cuatro más cercanos.
  - Por interpolación bicúbica. Se utiliza una submatriz generalmente constituida por los 16 píxeles del entorno. Esta interpolación elimina los saltos bruscos de intensidades, obteniéndose una imagen con mayor compensación de tonos.

Al aplicar estas ecuaciones al conjunto de puntos de la imagen (píxeles) con las correspondientes cotas sobre el terreno obtendremos las correcciones necesarias (inclinación del eje óptico y desplazamiento debido al relieve) para pasar del sistema de coordenadas imagen al de coordenadas terreno, es decir se pasa de una proyección central a una proyección ortogonal.

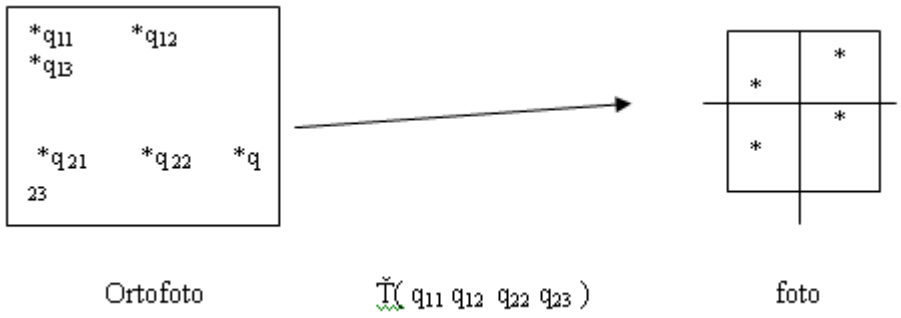


Figura 4. Método del "Anchor-point"

Pero en la práctica para reducir el número de operaciones lo que se hace es aplicar la transformación T en un número reducido de puntos $\{q_i\}$ de la ortofoto (método del "Anchor-point") y a partir de ellos se aproxima la función T por otra función $\tilde{T}$ que interpola en el resto de los puntos.

La distancia entre los q_i es función de:

- La morfología del terreno
- La precisión requerida

En la práctica se toma como distancia entre puntos la misma que en el MDT de esta forma la transformación solo se produce para los puntos de la malla y aunque esto reduce el tiempo de cálculo requiere que el espacio dentro de cada cuadrícula sea llano y sin líneas de ruptura.

Estos procedimientos inciden en la precisión de la ortofoto, puesto que la rectificación diferencial no se realiza en todos los píxeles de la imagen sino únicamente en aquellos que coinciden con los puntos definidos en el modelo digital del terreno. Es decir, los píxeles intermedios presentarán una posición aproximada y por tanto estarán afectados de errores planimétricos.

Hoy en día con los procesadores que hay se puede hacer la transformación para todos los píxeles

39.2. Calidad y precisión de la ortofoto

La mayoría de los usuarios tienen la impresión equivocada de que los techos de los edificios o las copas de los árboles muy altos en una ortofoto están en su propia localización planimétrica, es decir los tejados de los edificios están sobre sus cimientos, pero esto solo ocurre cuando las exposiciones se hacen a gran altura ya que entonces el desplazamiento radial debido al relieve de los edificios u otras estructuras es mínimo.

Como generalmente usamos escalas en las que los desplazamientos debido al relieve son significantes, tendremos que solo la base de las edificaciones y de los árboles estarán en su propia altimetría. Es decir, en una ortofoto digital tradicional no se consigue eliminar la distorsión radial de los edificios, árboles, presas, etc.

La única solución para arreglar los desplazamientos de las estructuras altas es mover físicamente la imagen del edificio usando técnicas de tratamiento de imágenes (ortofotos verdaderas).

Además de lo citado anteriormente, existen defectos en las ortofotos debido a una mala precisión planimétrica por errores en los puntos de control de la aerotriangulación y pérdidas de imágenes (o dobles imágenes) debido al DTM que se ponen de manifiesto al comparar ortofotos adyacentes.

La existencia de imágenes muy deformadas es debido a un relieve excesivo en los bordes de la foto, ya que la perspectiva dada por la proyección central produce en las fotos imágenes

pequeñas, pero al aplicar el MDT y hacer una proyección ortogonal su influencia abarca una zona sensiblemente mayor que la ocupada en la foto, produciéndose en los valles un efecto similar pero de signo contrario.

Todo lo anterior pone de manifiesto que para la producción de ortofotos hay que tener especial cuidado en algunos aspectos como son:

- **Proyecto de vuelo**.

Generalmente la producción de ortofotos requiere una escala de fotografía diferente que la que se requiere para hacer cartografía convencional (restitución de la planimetría y de la altimetría),

En cartografía convencional siempre hay una relación directa entre escala de mapa y escala de fotograma y en el proceso fotográfico una vez acabada la tarea fotogrametrica de restitución siempre hay una fase de formación que de alguna manera retoca (generalización, simbolización, etc.) la información restituida y la hace presentable y legible al usuario conforme a unas normas cartográficas.

Sin embargo en la confección de ortofotos el coste de la producción se aumenta por el escaneado, rectificación y tratamiento y mosaicado de las imágenes finales por lo que siempre se busca obtener el menor número de ortofotos que recubra la zona.

- **Aumentos**.

Los sistemas digitales tienen prácticamente una flexibilidad sin limites, pero esto obliga a poner limitaciones.

En general una foto aérea no debe ser aumentada mas de 8 o 9 veces y una buena relación entre el aumento y el costo o rendimiento es de 5 veces. A partir de 5 veces el rendimiento es bueno pero la calidad es baja.

- **Edición y manipulación**.

Depende del Software y Hardware elegidos para visualizar (editar en pantalla) las ortoimagenes y para su dibujo en soporte gráfico (ploteado).

Resumiendo la calidad de una ortofoto depende de:

- La cámara métrica empleada.
- Aumento de la imagen final (ortofoto) respecto a la imagen original (fotograma).
- Sensibilidad y precisión métrica del escáner.
- Tamaño de pixel elegido al escanear los negativos.
- Tamaño de pixel final expresado en unidades terreno.
- Procedimiento de rectificación.
- Densidad de puntos y calidad del MDT.

- Morfología del terreno y relieve de las construcciones.
- Precisión de los puntos de aerotriangulación.
- Tratamiento final de las imágenes ortoproyectadas.

La mejor comprobación es comparar o superponer ortofotos adyacentes.

39.2.1. Influencia de los errores del MDT

Los errores en elevación del MDT cambian las coordenadas imagen de los objetos, por lo que pueden aparecer desplazados en la ortofoto. En Fotogrametría clásica se estudiaba la relación que había entre la altura de un objeto y desplazamiento que le correspondía en la imagen. Se puede utilizar la misma relación para calcular el desplazamiento en la imagen que corresponde a un error de altura en un punto del MDT. Sólo hay que equiparar la altura h del objeto con el error Δh en un punto del MDT

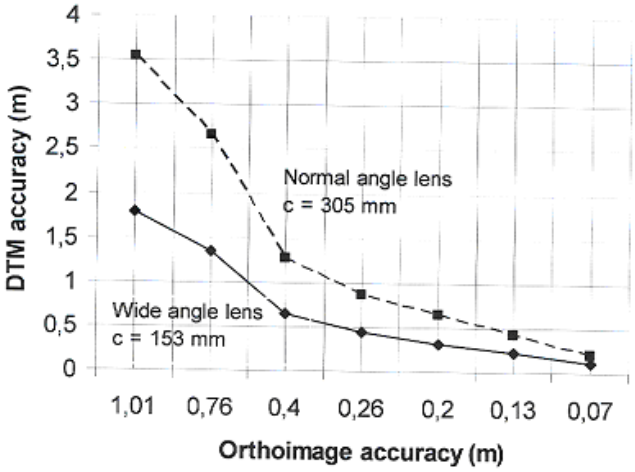


Figura 5. Relación entre la precisión en ortoimagen y precisión el MDT

Por Geometría clásica es fácil demostrar que el desplazamiento introducido por el relieve en la imagen crece con la altura del objeto y decrece con la altura de vuelo.

(5)
$$\frac{r_B}{D} = \frac{f}{H}, \quad D = \frac{H r_B}{f}$$

$$\frac{r_T}{D} = \frac{f}{H-h}, \quad D = \frac{r_T (H-h)}{f}$$

Y ahora igualando las dos relaciones:

(6)

$$D = \frac{Hr_B}{f} = \frac{r_T(H-h)}{f}$$

$$Hr_T - hr_T - Hr_B = 0$$

$$H(r_T - r_B) = hr_T$$

$$\frac{H\Delta r}{r_T} = h$$

Y de ahí: $\Delta r = \frac{r_T}{H}h$. Si h es el error en altura del MDT en un punto, ya tenemos el desplazamiento

Δr producido en la imagen. Ej. H= 4500 m f=150 mm, r_T = 100 mm

U error de 4.5 m de altura en el MDT produce un desplazamiento = $\frac{4.5}{4500}100 = 0.1mm$

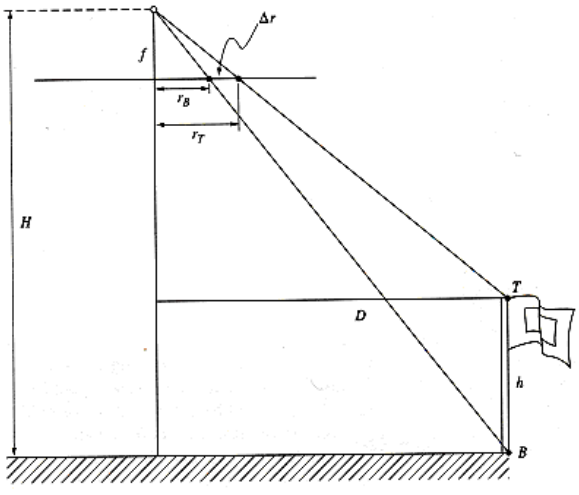


Figura 6. Desplazamiento debido al relieve en la imagen

Como la escala es 1:30000, el desplazamiento es: 0.1*30000/1000 = 3 m que puede aparecer desplazado en la ortofoto ese punto aproximadamente por lo que habría que introducir ese valor

en la ecuación de colinealidad imagen-terreno para obtener la influencia real del error en altura, que será del mismo orden.

39.3. Modelo Digital de superficie

Ya se ha visto que se necesita disponer de un MDT para poder ortorectificar las imágenes. Además existe la posibilidad de disponer del MDS. Con él se produce la true orto. Como se ve en el dibujo, el MDT es la representación numérica del terreno suponiendo que no haya edificios ni árboles, el MDS es la representación numérica de lo que se vería desde el avión tejados, copa de los árboles y terreno desnudo no haya lo anterior.

Figura 7. Modelo digital de superficie (verde) y Modelo digital del terreno (rojo)

En ortofoto interesa que la base de los edificios esté en su sitio, por eso se utiliza el MDT, sin embargo, los tejados de los edificios estarán desplazados. Si lo que se desea obtener es una rectificación en la que la base y el tejado del edificio estén en su sitio, se está hablando de la true orto y habrá que disponer de un buen MDS.

¿Como se obtenían el MDT y el MDS? En el tema 38 se estudia la obtención del MDE por correlación fotogramétrica. Realmente lo que se obtiene es el MDS porque el correlador sigue los tejados y las copas de los árboles, que es lo que se ve desde el avión. Posteriormente hay que editar manualmente ese modelo, bajando los puntos al terreno e incorporando líneas de ruptura para obtener el MDS definitivo.

Actualmente se está introduciendo la tecnología LIDAR para obtener los MDT, MDS. Desde el sensor aerotransportado se emiten pulsos de luz láser y se mide el tiempo de recorrido, con lo que se obtiene la distancia al terreno. Una de las ventajas de utilizar estas técnicas es que para un pulso emitido se obtiene mas de un retorno, es decir, el rayo rebota en la copa del árbol, con lo que se obtiene el MDS y también penetra a través de la cobertura vegetal para rebotar en el suelo, con lo que se obtiene el MDT.

Sobre la penetración hay una regla práctica: si desde el interior del bosque se ve el avión el lidar penetrará hasta el suelo. Pero donde no penetra el lidar es en los edificios. Para eliminar los edificios y obtener la altitud del terreno se han desarrollado algoritmos que eliminan los edificios, basándose en los cambios de pendiente. Se ha estimado que el 90% del trabajo de clasificación de la nube de puntos se puede realizar automáticamente, pero el resto, que hay que hacerlo manualmente, consume el 90% del tiempo de edición – clasificación.

Finalmente, cuando la nube de puntos lidar está depurada y clasificada, hay que ir a un proceso de interpolación para obtener la malla regular del MDT y la malla regular del MDS. En fotogrametría, después de depurar la malla obtenida por correlación y haber obtenido las líneas de ruptura, hay que ir al proceso de interpolación para obtener la malla regular MDS.

En la figura 8 se muestra un pulso del sensor con sus dos rebotes, retornos o reflejos uno en la copa y otro en el terreno. En postproceso habrá que etiquetar o clasificar cada punto para obtener el MDT y el MDS.

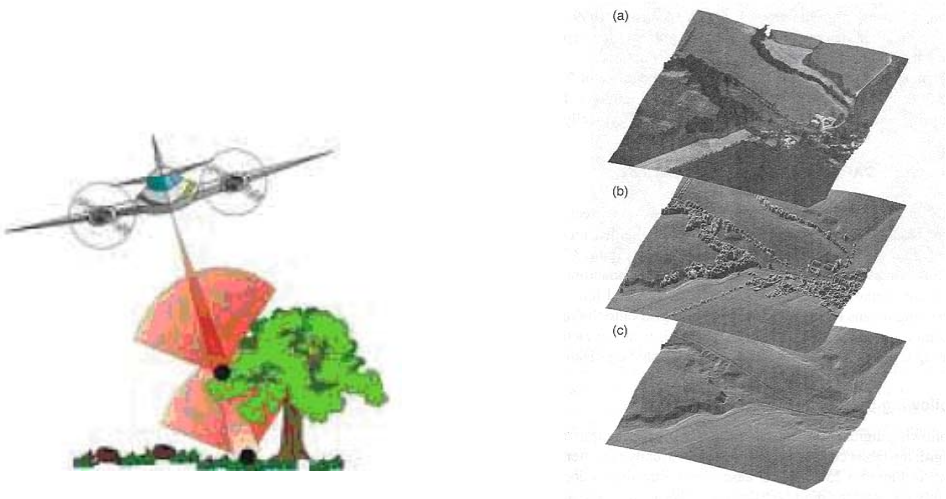


Figura 8. Izquierda: pulso del sensor. Derecha Arriba: imagen original. Der. Centro: MDS. Der. Abajo: MDT

En la figura 8 (imagen derecha) se aprecia en la capa superior la fotografía original, en la capa intermedia se representa el MDS, y en la capa inferior está el MDT, después de haber depurado el anterior.

Solo queda pendiente la cuestión de la precisión y resolución adecuadas que tiene que tener el MDS para que no aparezcan quiebros en las tejados y fachadas de los edificios en las true ortos. La resolución idónea del MDS está relacionada con la resolución de las imágenes digitales. Según pruebas pilotos que se han realizado, parece ser que cuando la resolución de imagen es de 10 cm. Por píxel, la resolución del MDS debe ser la misma, para que cada píxel tenga su altitud. Con LIDAR no se puede obtener (hoy, 2007) una nube de puntos cada 10 cm por lo que

hay que volver a los modelos estereoscópicos y a la obtención de altitudes por restitución, pues la correlación no da precisión suficiente. O eso o producir true ortos de menor resolución.

La figura 9 muestra otro ejemplo de MDT y su correspondiente MDS. Se aprecia como ya han desaparecido los edificios y el bosque, los primeros por algorítmica y el segundo por filtrado de los datos lídar.

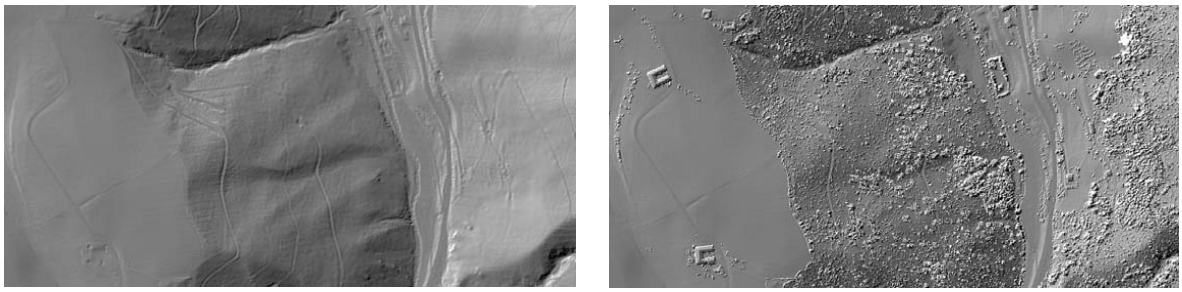


Figura 9. Ejemplo de MDT (izquierda) y MDS (derecha)

39.4. Ortofotos verdaderas

El término ortofoto (*True Ortho*) verdadera se refiere a un producto en el que además de las correcciones efectuadas en las ortofotos tradicionales se intenta:

- Minimizar los efectos debidos a la altura de los objetos convirtiendo la ortofoto en una proyección prácticamente ortogonal mediante la detección de zonas ocultas
- Minimizar en la medida de lo posible el efecto de las sombras.

Para la realización de ortofotos verdaderas es necesario sustituir el habitual MDT por un MDS (modelo digital de superficies) para evitar el problema que se muestra en la figura 10.

Lo correcto sería que P y Q hubieran caído en el mismo punto ($Q_o = P$) en la ortofoto , pero no es así ya que el punto Q se representa en Q'_o

Pero ahora si consideramos un MDS (modelo digital de superficie) tendremos que:

El punto Q es representado correctamente en Q_o

Mejora de la ortoproyección por la detección y corrección de zonas ocultas y efecto de las sombras

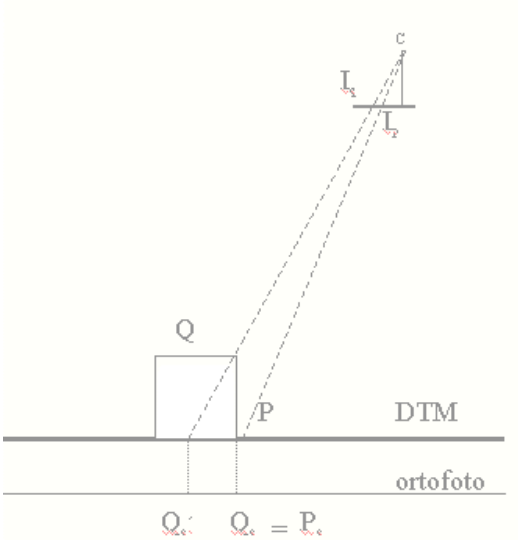


Figura 10. Ortofoto

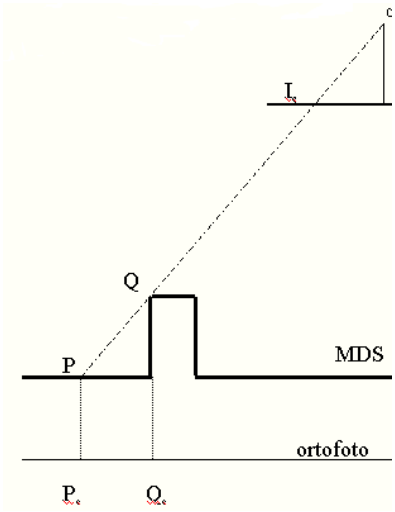


Figura 11. Ortofoto verdadera (True orto)

Las zonas ocultas y las zonas de sombras son los defectos más importantes en las ortofotos

Siendo su influencia mayor en grandes escalas y sobre todo en zonas urbanas donde se producen cambios bruscos en la imagen debido a la altura de los edificios.

Vamos a ver un esquema del flujo de trabajo empleado para la detección de estas zonas con la finalidad de poder compensar sus efectos en el proceso de Ortoproyección

Siempre se parte de que hay múltiples imágenes distintas del mismo punto objeto y de todas ellas elegiremos una para el proceso de ortofoto, imagen principal, y el resto serán las imágenes secundarias que se emplearán para obtener la información necesaria de las zonas ocultas y de sombras y que se aplicará a la principal para corregir estos defectos.

39.4.1. Detección y compensación de zonas ocultas

Las zonas ocultas son detectadas usando el Z-buffer (almacén de zonas ocultas) y el index map (mapa de índices).

El Z-buffer es un conjunto de matrices formado por dos matrices 2-D en el plano de la imagen.

1 Una matriz del conjunto se utiliza para localizar los puntos objeto en el terreno a partir de cada punto imagen

2 La otra matriz se emplea para registrar la distancia entre el centro de proyección y el objeto siendo estas distancias inicializadas con valores muy grandes.

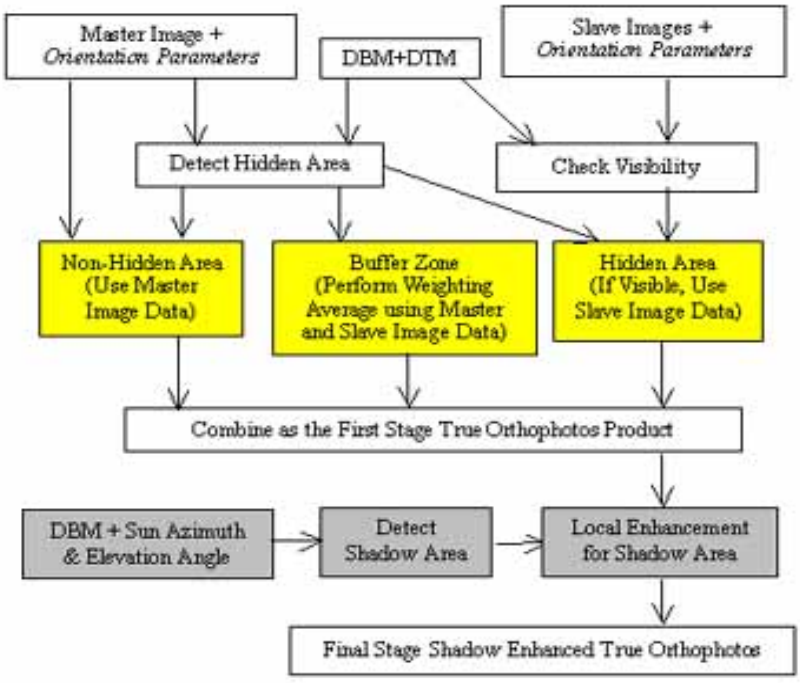


Figura 12. Detección y compensación de zonas ocultas

El index map es también una matriz 2-D pero en el plano del terreno y se utiliza para identificar si el punto terreno está oculto o es visible.

Superponiendo el MDT al MDB (modelo digital de superficies o edificios "building) se determinan las coordenadas de la superficie del objeto aplicando a estas coordenadas las

ecuaciones correspondientes a la condición de colinealidad se calculan las coordenadas imagen, que posteriormente son interpoladas, por el punto más cercano, para cada píxel terreno.

- Así la distancia de proyección es calculada y comparada con la almacenada en el Z-buffer.

- Si la nueva distancia calculada es mayor, la célula correspondiente en el index map es marcada como oculta.

- En caso contrario se recupera el primer valor registrado en el Z-buffer y que fue marcado como oculto.

- De esta manera se van actualizando los valores del Z-buffer y se van liberando los puntos (zonas) visibles.

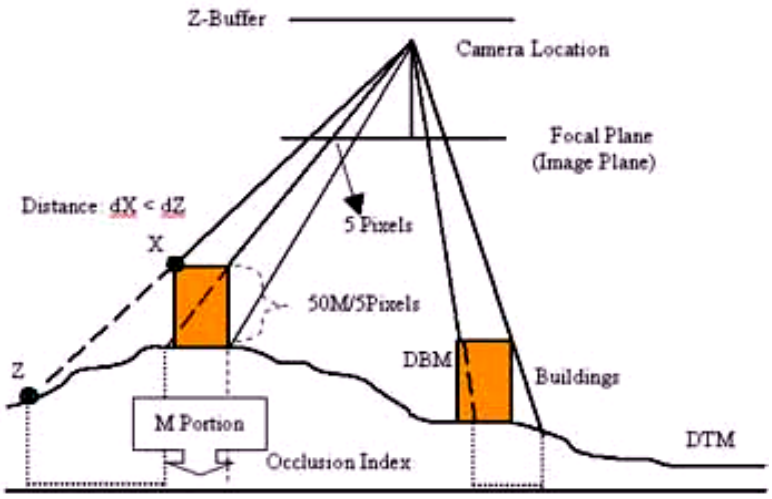


Figura 13. Detección y compensación de zonas ocultas

Ejemplo: Sean las distancias de la proyección de los puntos objeto X y Z, dX y dZ respectivamente.

- Como dX<dZ en el index map la célula correspondiente a Z es marcada como oculta y la información correspondiente a X podrá ser almacenada en el Z-buffer.

- Como la detección de zonas ocultas que estamos mencionando se hace mediante secuencias horizontales en la foto, ciertos píxeles alrededor de elementos superficiales muy inclinados pueden ser omitidos, como por ejemplo en la zona M.

- Para solucionar este problema en una siguiente fase son introducidos pseudo-píxeles terreno a lo largo de las proximidades de la superficie vertical.

- Para determinar el número de pseudo-píxeles se emplea la diferencia de altura del elemento vertical y la distancia de la proyección.

Por ejemplo: un edificio tiene una altura de 50 metros y la longitud de la proyección es de 5 píxeles imagen, así los pseudo-píxeles son colocados en un espacio inferior a 10 metros, aplicando de nuevo las reglas de detección para estos pseudo-píxeles se completa la zona de búsqueda de zonas ocultas.

- Debido a los errores numéricos de la interpolación los puntos o líneas aislados pueden aparecer en el index map, por lo que es necesario un proceso posterior de refinamiento.

- Con el mecanismo de detección de zonas ocultas y mejora de la ortoproyección se minimiza el defecto producido por zonas ocultas

- Lo que se hace es corregir la imagen principal, para lo cual en cada píxel oculto en dicha imagen se tomar el valor de gris correspondiente a dicho píxel en alguna de las imágenes secundarias.

- Para esto se consulta el index map de estas imágenes secundarias y se chequea la posibilidad de obtener estas zonas que son ocultas en la imagen maestra.

- Así se van rellenando todas las zonas que aparecen como ocultas, utilizando posteriormente alguna técnica de ajuste radiométrico para evitar discontinuidades en la imagen principal.

39.4.2. Detección de sombras y mejora de la ortofoto.

La técnica es similar a la anterior pero en este caso el plano del Z-buffer se construye perpendicular a la dirección del Sol.

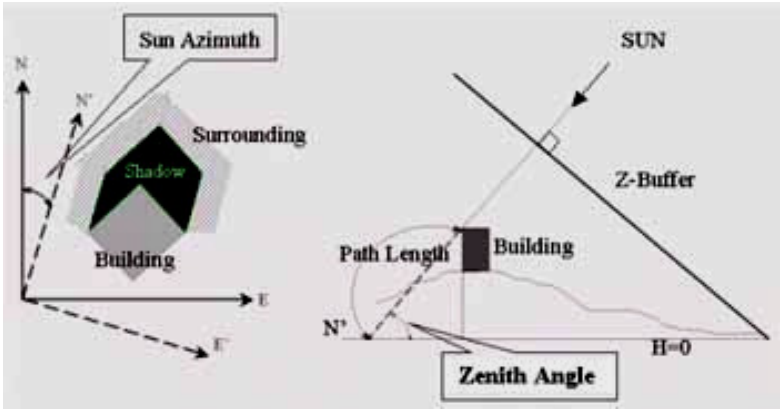


Figura 14. Detección de sombras y mejora en la ortofoto.

En el caso de no saber esta dirección, se puede siempre calcular a partir de la sombra de los edificios, es decir, el ángulo Zenital se obtiene a partir de la razón de la altura del edificio y la longitud de la sombra.

En el caso de la detección de sombras el valor almacenado en el Z-buffer es la distancia entre la superficie del objeto y la referencia local de alturas.

Figura 15. Ortofotos convencionales arriba. Abajo: true ortos

En la siguiente figura tenemos:

a).- Solo la corrección del desplazamiento debido al relieve.

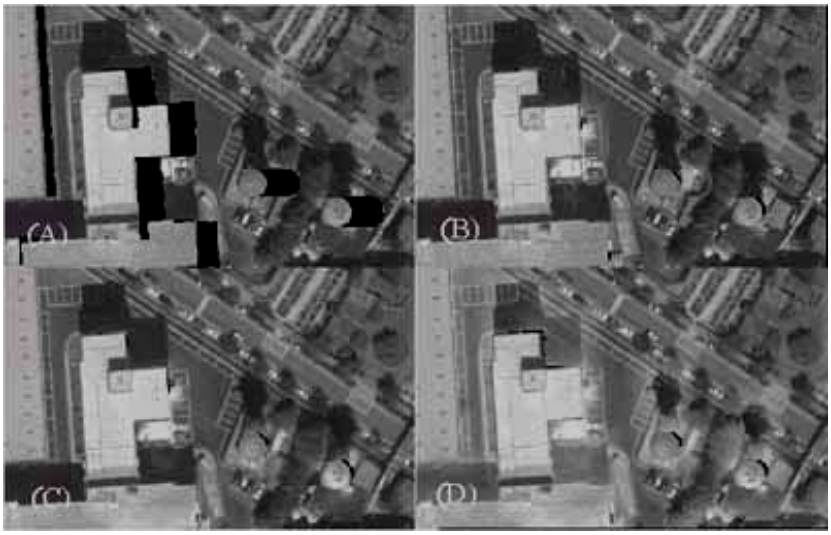


Figura 15 bis. True ortos

b).- Mejora y aplicación de zonas ocultas sin suavizado.

c).- Compensación de zonas ocultas utilizando técnicas de mosaicado.

d).- Aplicación de las mejoras en zonas de sombras.

39.5. Edición y mosaicos de ortofotos

Hoy día los SIG pueden contener capas con imágenes ortocorregidas. Como un área del proyecto puede ser cubierto con muchas imágenes, lo normal es formar con ellas un mosaico continuo cumpliendo las siguientes condiciones:

- que geométricamente esté georreferenciado y ortorrectificado,
- que radiometricamente esté equilibrado o balanceado
- que digitalmente, las juntas entre dos imágenes tengan los píxeles mezclados para que no se noten.

Figura 16. Creación del mosaico con imágenes e vuelo

El mosaico es un producto derivado muy útil pues permite cubrir grandes áreas de manera continua. En el mosaico se puede medir en dos dimensiones, pero es más interesante combinar el mosaico con el MDT y así obtener las tres coordenadas de cada píxel. Tienen la misma desventaja que las ortofotos: han pasado por un proceso de remuestreo lo que supone una pérdida de resolución y una posible pérdida de precisión por los errores introducidos con el MDT. La generación de mosaicos presenta problemas de estética ya que entre las distintas imágenes puede haber grandes diferencias de calidad, variaciones temporales, distintas alturas del sol, distintas condiciones atmosféricas, objetos móviles, variaciones en las películas o sensores, y otras discrepancias, las cuales, todas juntas, producen una variedad de tonalidades cromáticas.

Estas discrepancias pueden ser muy difíciles de corregir y balancear y si el mosaico consta de muchas imágenes, puede llevar mucho tiempo conseguir un color realista y balanceado. Se complica más la formación del mosaico cuando hay que combinar el pancromático con el color pues en pancromático la resolución es mayor y habrá que pasar antes por un proceso de pan-sharpening por el que se colorea la imagen pan con la información radiométrica de las bandas color.

Balanceado. Después de producir una serie de ortofotos, lo normal es mosaicarlas para tener una única ortofoto que cubra todo el territorio de interés. Uno de los problemas del mosaicado es que hay diferencias de brillo y contraste entre las distintas ortofotos, debido a las desiguales condiciones de las tomas (distinto ángulo de visión, distinta hora, etc) y hay que ir a un proceso de balanceado o equilibrado radiométrico para que no aparezcan saltos de tonalidad entre una ortofoto y las colindantes.

Para que se pueda dar el proceso del balanceado tiene que haber entre las distintas ortofotos zonas comunes, es decir, las ortofotos tienen cierto recubrimiento. El proceso se basa en que los histogramas de cada ortofoto en las zonas de recubrimiento tienen que ser iguales. Los histogramas se igualan a uno tomado como referencia aplicándoles un sesgo y ganancia, corrección en brillo y contraste para igualar las medias y las desviaciones estándar.

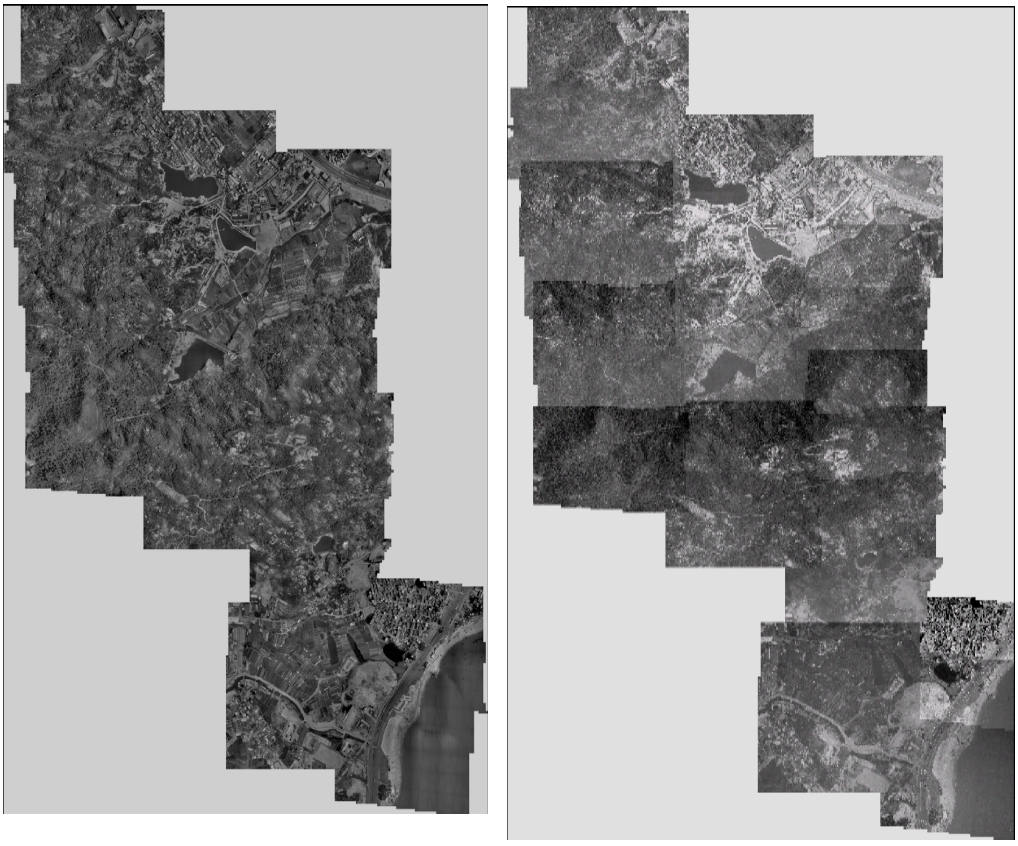


Figura 17. Izquierda: resultado de balencear el mosaico de la derecha

Sea $b_i = \frac{s}{s_i}$, con s = desviación estándar del histograma de referencia y s =desviación del histograma que se está balanceando.

Y sea también $a_i = \overline{ND} - b_i \overline{ND_i}$, siendo $\overline{ND}$ el promedio de los niveles digitales en el histograma de referencia y $\overline{ND}$ el promedio de los niveles digitales en el otro histograma. Los coeficientes del ajuste son a_i, b_i los coeficientes del ajuste. Los valores corregidos de salida vienen dados por: $ND' = a_i + b_i ND_i$

Esta corrección se aplica a todos los píxeles de la imagen i. Para la siguiente imagen con solape hay que calcular otos parámetros a,b nuevos.

Otro problema que hay que solucionar al mosaicar imágenes es el del vigneting, que consiste en un oscurecimiento progresivo de la imagen al aumentar la distancia al centro. Se corrige con un proceso de dodging. El dodging consiste en teselar la imagen y calcular el valor promedio de los píxeles de cada tesela. Se obtiene una matriz de valores promedio que hay que manipular para obtener una tabla de color, con la que se asignan nuevos colores a los píxeles de cada tesela. Un problema añadido es que aparecerán saltos de tono en los límites de tesela con tesela por lo que hay que convolucionar la imagen con un filtro paso bajo.

Uno de los productos finales del proyecto PNOA es el mosaico de ortofotos. Cada mosaico cubre la superficie de una hoja del MTN50, aproximadamente 480 km^2. El mosaico está formado por los cuatro cuartos de cada cuarto de una hoja MTN50 es decir, por 16 ortofotos, cubriendo cada una 3000 Ha aproximadamente y con 0.5 m de resolución, aunque ya se están produciendo ortofotos de 25 cm de resolución. También se realiza el mosaico de 64 ortofotos, cada una de las cuales equivale a un cuarto de las anteriores, dependiendo de la normativa de la comunidad autónoma correspondiente.

Bibliografía

[1] Modern Photogrammetry por : Edward M. Mikhail, James S. Bethel y J. Chris McGlone.De la editorial Jhon Wiley & Sons, Inc.

[2] Apuntes de fotogrametría digital de F.J. Hermosilla y S. López Cuervo.

[3] Ackerman y Krauss: Presente y futuro de los MDT.

Tema 40. Fundamentos del sensor Lidar. Concepto de rango de penetración y múltiples retornos. Sensores y plataformas. Principio del Lidar aerotransportado. Calibración y tratamiento de datos Lidar. Utilización del Lidar en la obtención del MDT y MDS. Modelos en 3D. Otras aplicaciones.

40.1. Fundamentos del sensor Lidar

40.1.1. Introducción

La técnica Lidar (LIght Detection And Ranking, es decir detección y medida de luz) hace referencia al sistema que utiliza la radiación electromagnética en las frecuencias ópticas del visible e infrarrojo cercano, siendo capaz de realizar mediciones de distancia.

Esta técnica, que originalmente era utilizada con fines militares, en la actualidad se está convirtiendo en una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas para la generación de MDT de gran densidad y elevada precisión.

Se basa en emplear un rayo de luz para medir distancias y propiedades del medio recorrido a través de las variaciones de la longitud de onda del pulso emitido. Lo que se hace es emitir desde el láser un pulso óptico a un objeto y medir el tiempo del eco o pulso de retorno. El tiempo es convertido en distancia al objeto utilizando como dato la velocidad de la luz. Algunos sistemas permiten captar ecos múltiples y también permiten medir la reflectancia de la superficie.

Por tanto, se podría decir que esta técnica, también denominada como radar de láser o radar óptico, es una extensión directa de las técnicas radar convencionales puesto que se basa en los mismos principios pero con la diferencia de utilizar longitudes de ondas más cortas (de 10.000 a 100.000 más corta que en radar convencional), lo que proporciona mayor exactitud y resolución.

40.1.2. Fundamentos básicos

El sensor Lidar es un sensor activo que transmite luz hacia un objeto o blanco normalmente en el terreno. Este rayo de luz transmitido, generado por un equipo láser, interactúa con el blanco objeto y cambia sus características, de modo que estos cambios producen una nueva luz reflejada o dispersada con dirección de vuelta al sensor donde es registrada por un telescopio que la dirige a un detector para su posterior análisis. Los cambios en las propiedades de la luz,

como su intensidad o color, permiten determinar algunas propiedades del objeto o propiedades del medio atravesado. Por último, la medida del tiempo que tarda la luz en el camino de ida y vuelta se usa para determinar la distancia entre el sensor y el objeto iluminado.

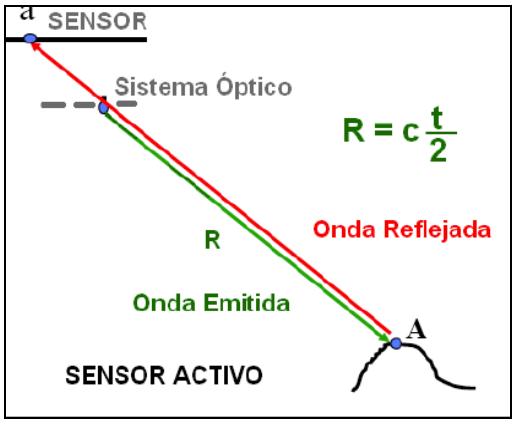


Figura 1. Esquema del la técnica Lidar

Las aberturas del transmisor y receptor se montan de forma que las trayectorias emitidas y recibidas compartan la misma trayectoria óptica (los diámetros típicos son del orden de 8 a 15 cm). Esto asegura que la superficie objeto de los puntos iluminados por el láser están siempre en el campo de vista FOV del receptor óptico. La estrecha divergencia del rayo láser define el campo de vista instantáneo (IFOV). Los valores típicos del IFOV o divergencia del rayo son del orden de 0,2 mrad a 2 mrad.

El límite físico teórico del IFOV es determinado por la difracción de la luz, lo que ocasiona una imagen borrosa. Por tanto, el IFOV es función de la abertura de transmisión D y de la longitud de onda de la luz. Para luz espacialmente coherente el límite por difracción del IFOV es:

$$IFOV_{DIF} = 2{,}44 * \lambda/D$$

El IFOV de la óptica del receptor no debe ser más pequeño que el rayo láser transmitido. Debido al muy estrecho IFOV del láser, el rayo óptico al moverse en la dirección de vuelo proporciona la segunda dimensión del rayo de la fuente láser.

Los componentes hardware básicos de un sistema Lidar son: transmisor, receptor, detector y la unidad de medida de tiempo. El transmisor se encarga de generar los pulsos de luz (son pulsos de laser por las ventajas que suponen sus propiedades: baja divergencia del rayo, una anchura espectral muy estrecha e intensos y cortos pulsos) y dirigirlos al objeto. La divergencia del rayo láser debe ser suficientemente pequeña de forma que caiga dentro del FOV del sistema receptor para todas las distancias de interés. Normalmente un simple telescopio puede usarse para

disminuir la divergencia del rayo láser (aumenta el diámetro del rayo), pues lo que hace es dilatar el rayo para proporcionar la adecuada colimación del éste en la transmisión a la atmósfera.

Las propiedades del pulso láser son una fuente ideal en la técnica Lidar pues permiten medir distancias y comprobar las dispersiones sufridas por la señal. Para medir distancias, la longitud de los pulsos del rayo láser deben ser mucho más corta que la resolución de distancia necesaria. Por tanto la longitud temporal de los pulsos debe ser inferior a 30 ns, y la frecuencia de repetición del pulso PRF del láser debe ser suficientemente baja como para permitir que un pulso láser tenga tiempo para determinar una distancia, de forma que no se produzca otra señal antes de la llegada de otro pulso. Estas condiciones implican trabajar con PRF de alrededor de 20 kHz para un lidar trabajando con objetos cercanos por ejemplo.

El Receptor de un Lidar recoge y procesa la señal luz devuelta obtenida por dispersión, reflexión o colimación, y la dirige a un fotodetector, donde un dispositivo convierte la señal luminosa en una señal eléctrica. Un elemento óptico recoge la luz y la focaliza a una zona de registro pequeña. El tamaño de esta componente óptica es muy importante en la determinación de la efectividad del sistema Lidar. Una vez capturado el rayo, la luz es procesada de diferentes formas y enviada al sistema detector. El procesamiento está basado en la longitud de onda, la polarización, y/o distancia dependiendo de los propósitos para los que ha sido diseñado el Lidar.

A continuación se procede a la detección y registro electrónico de la señal en forma de intensidad como función de la altitud o distancia recorrida. El detector convierte la luz en una señal eléctrica siendo el registrador el dispositivo electrónico que procesa y graba esta señal eléctrica. La tarea del receptor acompañado del amplificador es detectar el eco o ecos producidos, y sobre todo el extremo inicial y final del pulso. Las prestaciones del detector definen el rango del sistema mientras que las prestaciones de los valores umbrales o límites del detector y del contador de tiempo definen la resolución y la exactitud de la distancia medida.

40.2. Concepto de rango de penetración y múltiples retornos

Un factor importante a tener en cuenta en el registro de los ecos del pulso es discriminar bien su separación, ya que el tiempo de separación corresponde directamente a la distancia de superficies que reflejan. Un pulso láser puede producir *múltiples reflexiones o retornos* si la luz ilumina distintos objetos que se encuentran a diferentes distancias. En este caso, el pulso cambia

al iluminar otros objetos y los objetos son tan grandes que tienen suficiente factor de reflexión para generar ecos.

También influye el diámetro del rayo al iluminar varios objetos. Se pueden separar los ecos si Δt es mayor que la duración del pulso τ. Por tanto, el requerimiento mínimo necesario para detectar dos ecos desde distintas superficies, es que la distancia d tiene que cumplir: $d > \frac{c \cdot \tau}{2}$

Normalmente la detección electrónica de un eco necesita un tiempo de recuperación antes de enviar el siguiente eco para que pueda ser detectado, por tanto, la necesidad de separación entre ecos debe ser del orden de $d > c \cdot \tau$.

La mayoría de los sistemas pueden detectar varios ecos pero registran y procesan solamente el primero y el último eco. Ambos términos se asocian con los objetos más altos y más bajos respectivamente, aunque esto no es completamente exacto siempre.

40.3. Sensores y plataformas

Se pueden establecer diferentes clasificaciones de tipos de sensores LIDAR tanto en función de su construcción como de las aplicaciones en las que se utilizan. Desde un punto de vista general, se pueden distinguir los Lidar comerciales utilizados en aplicaciones topográficas, batimétricas y terrestres, y basados en las mediciones de distancia desde el propio sensor a un determinado objeto o blanco y que son los más simples. Los sistemas láser modernos combinan la capacidades radar y un sistema óptico para permitir la medida simultánea de la distancia, factor de reflexión, velocidad, temperatura, azimut y ángulo de elevación de un objeto o blanco.

Por otro lado se encuentran los Lidar propios de aplicaciones científicas como los empleados en la medición de las propiedades de la atmósfera terrestre (Ej. DIAL, utilizados en la determinación de concentraciones químicas como el ozono).

También se pueden clasificar en función de la de construcción del sistema láser, es decir, en si utilizan luz coherente o no coherente, pulsos de luz u onda modulada *(Continuous Wave)*, con medida de distancias o sin medida de distancia, la posibilidad de utilizar una longitud de onda simple o dos longitudes de onda, cómo sea su configuración... La configuración típica en los sistemas modernos contiene un transmisor y receptor en la misma posición de entrada y salida *(monoestatico)*. Esta tipología se puede dividir a su vez en dos categorías: sistemas coaxiales, donde el rayo láser transmitido y recibido coincide con el FOV del receptor, y sistemas biaxiales donde el transmisor y receptor se colocan adyacentes uno al lado del otro. Otra configuración es aquella donde una fuente y un receptor se encuentran separados varios kilómetros *(biestático)*.

En función de las aplicaciones en las que se utilice el Lidar, el sensor se desplazará sobre diferentes tipos de plataformas: aviones, barcos, globos aerostáticos, satélites, vehículos sobre tierra, incluso en posición estática sobre un trípode en un laboratorio.

40.3.1. Sensores y plataformas en aplicaciones topográficas

Un Lidar topográfico funciona con un único pulso láser de longitudes de onda del infrarrojo cercano y también en el medio, donde la duración de los pulsos es del orden de 1ns. Normalmente tienen la posibilidad utilizar plataformas aéreas (aviones y helicópteros) y también es posible utilizarlos en plataformas satélite y en tierra firme.

La característica principal de estos sistema aerotransportados es que permite georreferenciar los puntos capturados sobre la superficie terreno por medio de observaciones integradas con un sistema de navegación preciso compuesto por un sensor GPS y una Unidad de Medidas Inerciales (IMU). Estos sistemas pueden a su vez trabajar con cámaras digitales o de video.

Del registro de una nube de puntos 3D georreferenciados se pueden obtener modelos digitales de elevaciones (MDE) y modelos digitales del Terreno (MDT) a partir del proceso de cálculo con los ecos del pulso de retorno (normalmente se trabaja con el primer y último eco).

En función de las plataformas que emplean (sistemas aerotransportados, espaciales o terrestres), se pueden distinguir los siguientes Lidar topográficos:

- El altímetro SLA-02 *(Shuttle Laser Altimeter)* de la NASA, es un altímetro compuesto por un telescopio de 38 cm y un láser emisor Nd:YAG. Su objetivo es obtener bases de datos globales de ecos laser cubriendo amplias extensiones de bosques en Canadá y Rusia de ecos láser y superficies de pastos en África del Sur y Australia. SLA-02 incluye un software especial que minimiza la saturación del eco recibido y, como consecuencia, optimiza la captura y recuperación de superficies especialmente rugosas en zonas de vegetación.
- El sistema GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) también de la NASA es transportado por el satélite ICESat *(Ice, Cloud and land Elevation satéllite)*. La duración del pulso de este altímetro es de 5 ns. La posición del altímetro en el espacio es determinada por un receptor GPS junto con un giroscopio. El tipo de láser es un Nd:YAG con un interruptor Q mecánico que opera en el infrarrojo cercano (1046 nm) para medidas topográficas y medida de aerosoles y otras características atmosféricas se utiliza la longitud de onda del verde.
- Sistemas Lidar sobre Helicóptero: sistema Geomapper de Laseroptronix, el Airborne Topographic Lidar System de QinetiQ Ltd, y el sistema Topoeye de Osterman Helicopter AB.
- Sistemas altímetros láser (*scanning laser)* comerciales que se sitúan sobre un avión con posibilidad de situarlos sobre helicópteros. Podemos citar ALS40 (Airborne Laser Scanning System) de Leica Geosystems, el sistema ALTM (Airborne Laser Terrain Mapper) de Opthec Inc, el equipo Lite Mapper de IGI mbH , el FALCON de Toposys GMBH, FLIP MAP, Aeroscan, DATIS. El sistema RASCAL *(RAster SCanning Airborne Lidar)* esta

dotado de un sistema INS *(Inertial Navegation System)* con capacidad de registro de 64 Hz y de un equipo GPS (*Global Positioning System)* que proporciona la posición 3D del avión, las huellas producidas por el Lidar son de un tamaño 1 metro de diámetro espaciados aproximadamente 1,5 m en ambas direcciones, siempre y cuando el avión no tenga aceleración, la precisión de la distancia medida es menor de 20 cm con valores típicos de 5 cm. La óptica se compone de un telescopio con un FOV de 12º y un filtro solo permite el registro de la longitud de onda de 523 nm bloqueando el infrarrojo. El láser es de NYd:YLF bombeado por un láser de diodo cuya frecuencia se dobla para producir pulsos de longitud de onda de 532 nm, con pulsos cada 6 a 19 nanosegundos, y una relación de repetición de pulsos (PRF) de 5 kHz. El mecanismo de escaneado lo genera un espejo poligonal de 45 caras giratorio, con una apariencia de rueda, el rayo láser se dirige al espejo poligonal y produce 45 barridos en una vuelta completa, la anchura de escaneado es de 16º. La posición del polígono es muestreada a 100Hz con una resolución de 16 bits respecto a una revolución simple.

40.4. Principio del Lidar aerotransportado

Los altímetros láser *(laser scanning)* proporcionan coordenadas tridimensionales (x,y,z) mediante un barrido láser de una serie de puntos terreno, distribuidos según perfiles perpendiculares a la línea de vuelo. Esta tecnología permite la generación del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) y MDS (Modelo Digital de Superficie) de gran calidad en la actualidad, además de un modelo de intensidades.

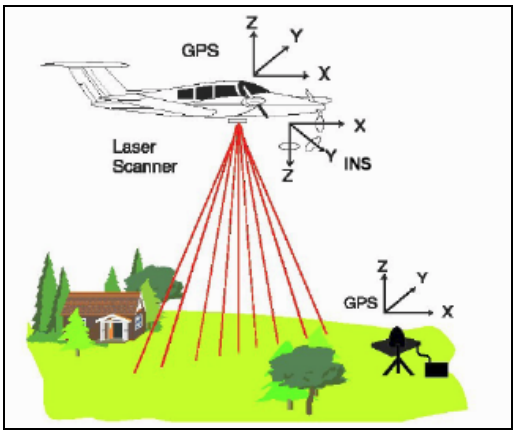


Figura 2. Esquema de la unidades del sistema Lidar

Como se muestra en la figura anterior, el sistema Lidar se compone de:

1) Un escaner Láser y unidad de refrigeración
2) Receptores GPS, uno instalado en el avión y otro en una estación de referencia terreno de coordenadas conocidas.
3) Una Unidad de Navegación Inercial (INS)
4) Unidad de almacenamiento y proceso
5) Algunos sistemas añaden una cámara digital o de video

Con esta tecnología, los puntos de un perfil del terreno se obtienen a partir de medidas de distancia según una dirección vertical óptica, por pulsos láser desde una plataforma aérea. Por tanto, la posición (x,y,z) desde la que se miden las distancias al terreno debe ser conocida tan bien como la dirección del vector distancia. En otras palabras, la orientación del sensor depende de la precisión del levantamiento aéreo, y debe obtenerse con gran exactitud.

La exactitud geométrica de estos sensores está íntimamente ligada con la calidad de su Orientación Exterior (OE) que es esencial. Evidentemente eso se consigue mediante medidas en vuelo de la orientación exterior con sistemas de navegación integrados. El escaner láser mide solamente el vector orientado desde la abertura del sistema láser a un punto objeto normalmente en el terreno. Los puntos 3D solo se pueden calcular si en cualquier instante se conoce la posición y orientación del sensor Lidar respecto a un sistema de coordenadas, por ejemplo el WGS84. Por tanto, para obtener medidas de distancias precisas en un sistema de coordenadas el sistema Lidar debe estar soportado por un sistema de posicionamiento y orientación integrado por un DGPS y una Unidad de Medidas Inerciales (IMU). Como un escaner láser tiene potencialmente una exactitud mejor que 1dm, el sistema integrado deberá mantener la misma precisión si queremos que sea eficiente. Además, la geocodificación de las medidas Lidar necesita una perfecta sincronización de todo el sistema: el sensor IMU, el GPS y los datos registrados por el scanner láser.

A partir del vuelo Lidar con el sistema integrado de sensores se obtiene dos conjuntos datos: los datos del sistema IMU/DGPS, y las distancias láser con los ángulos de barrido o escaneado instantáneo.

Suponiendo que el sistema de posicionamiento y operación proporciona exactitudes del orden de 1dm en posición y de 0,02º en orientación, se puede determinar con mucha precisión la localización de puntos terreno respecto del fijo a la Tierra.

En el cálculo deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros sistemáticos:

- Los tres ángulos de la plataforma del escáner láser descrito por los ángulos de Euler (roll, pitch y heading) con respecto al sistema de coordenadas fijo a la plataforma (origen en la unidad IMU).
- La posición del escáner láser respecto del IMU.
- La posición del IMU respecto del GPS

Estos datos se denominan *parámetros de calibración* y pueden determinarse de un levantamiento con escáner láser volando áreas de referencia en diferentes direcciones.

Por tanto, los puntos láser en WGS84 pueden calcularse a partir de tres conjuntos de datos:

1) Datos de calibración y parámetros de la plataforma
2) Medidas de distancias láser con sus respectivos ángulos de escaneado
3) Datos del sistema de posicionamiento y orientación DGPS/INS

Posteriormente se procede al cálculo de la nube de puntos láser distribuidos aleatoriamente en elevación y posición. La distribución de los puntos medidos depende del patrón de escaneado del sistema de escáner láser.

La ecuación geométrica general de la georreferenciación directa, necesaria en la determinación de puntos 3D, válida para cualquier sensor se obtendrá a partir de una serie de aplicaciones matemáticas entre los cuatro sistemas de coordenadas necesarios:

1.- Sistema geocéntrico de coordenadas, con origen en el centro de masas de la Tierra, y elipsoide WGS-84, (SG)
2.- Sistema de coordenadas local (SL). Se utiliza como referencia par ala medida de la actitud de la plataforma.
3.- Sistema de coordenadas de la plataforma del avión (SB)
4.- Sistema de coordenadas del sistema sensor (SS)

En primer lugar se deberá pasar del sistema láser al sistema IMU, lo que supone aplicar una matriz de Rotación R_{SS}^{SB} (del sistema sensor al sistema plataforma) y una traslación del vector X_{SS}^{SB}

(offset entre el sensor Láser e IMU). A continuación el sistema del sensor IMU es transformado en el sistema local orientado al norte y centrado en la antena GPS, lo que supone aplicar la matriz de rotación R_{SB}^{SL} (del sistema plataforma al sistema local) y la de traslación X_{SB}^{SL}. El paso final consistirá en realizar la traslación del sistema local al sistema de coordenadas global WGS-84.

40.5. Calibración y tratamiento de datos Lidar

Del modelo matemático del Lidar, los datos que conocemos son las observaciones, es decir:

a) Observaciones GPS de la posición del centro de la antena

b) Observaciones IMU (*roll, pitch y heading*)

c) Observaciones del láser en el sistema SB

y por tanto, los parámetros de calibración serán:

A. Los ángulos de transformación del sistema SS al SB;

B. La excentricidad de la antena;

C. Las correcciones de las posiciones GPS;

D. Las correcciones de los ángulos de IMU;

E. Y las correcciones de las medidas del escáner láser; ;

Los procesos para determinar estos parámetros del modelo de calibración pueden ser básicamente por calibración de laboratorio o por vuelo de calibración, y en el caso de las excentricidades por levantamiento topográfico. Estos procedimientos definen las estrategias de calibración.

40.5.1 Estrategias de calibración

El sistema conjunto integrado por los sensores Lidar/Sensor IMU/GPS necesita ser testado y validado para cada salida de captura a través de una estrategia de calibración adecuada. Por un lado, la calibración de laboratorio permite determinar los parámetros nominales del sensor, como son el sistematismo *(offset)* de la distancia láser medida, (se determina midiendo distancias a distintos blancos y con diferente factor de reflexión en un laboratorio). Igualmente se puede medir el sistematismo del ángulo de escaneado y la escala, midiendo distintos blancos y sus ángulos de escaneado. En el laboratorio se pueden determinar los ángulos de transformación del sistema sensor al sistema del IMU. Todas estas medidas de calibración suponen realizar medidas redundantes sobre un control independiente de exactitud superior, calculando las diferencias entre los datos

observados, determinando las diferencias $\Delta r_i = r_{i,observado} - r_{verdadero}$, y determinando los parámetros tras tratar estadísticamente las diferencias $\Delta r_i = \Sigma \Delta_i / n$

La otra estrategia de calibración, muy aplicada, supone realizar un vuelo de calibración y el proceso denominado *Resolución de la Línea de Calibración*. Para ello se utiliza un polígono de control permanente, si es posible en el aeropuerto base del avión, donde se establece un control terreno de forma que las medidas Lidar obtenidas son procesadas con el fin de verificar sus componentes, como son el equipo GPS, la Unidad de Medidas Inerciales (IMU) y el sensor Lidar. La resolución de la línea de calibración debe realizarse previamente a cada salida de medida Lidar con el fin de determinar los parámetros de calibración de los subsistemas que componen el conjunto Lidar, esto permite eliminar distorsiones sistemáticas durante el posproceso lidar propiamente dicho.

Es fundamental que se vuele el polígono de calibración tanto longitudinal como transversalmente mediante pasadas que permitan detectar errores sistemáticos como las variaciones de altitud, anomalías de cada pasada y, demostrar la repetibilidad de los resultados. Es importante que las pasadas transversales crucen todas las pasadas longitudinales para proporcionar máxima información, asimismo es necesario cubrir zonas totalmente despejadas de vegetación y planas e invariables en el tiempo. Además del vuelo específico de calibración, cada día de vuelo es preciso utilizar una pasada longitudinal para comprobar y, si es necesario, afinar los parámetros de la calibración, especialmente los valores de roll y factor de escala.

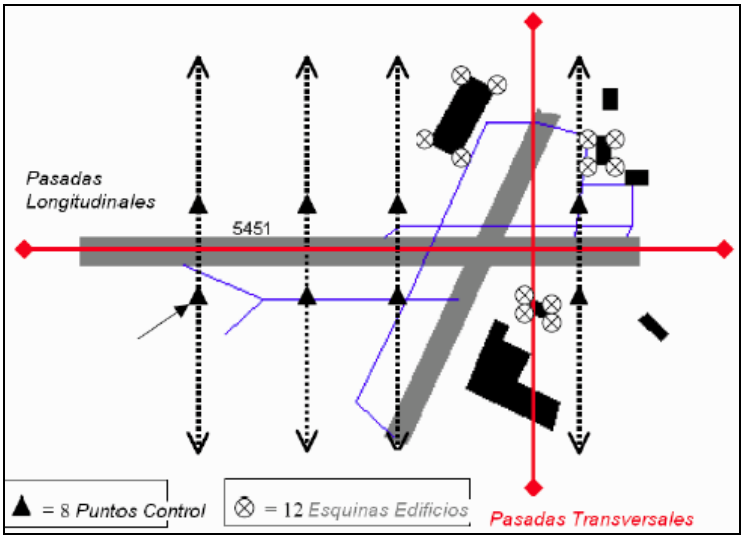


Figura 3. Polígono de calibración Lidar.

Los vuelos de calibración se realizan a la misma altura de vuelo del proyecto en cuestión para validar los parámetros de calibración del sistema lidar. Se puede utilizar también otro tipo de zonas como áreas de mallas regulares de puntos determinados con GPS en superficies planas despejadas de vegetación y distribuidas estratégicamente según el diseño del proyecto. Estas mallas, pueden estar compuestas por 40 puntos distribuidos en 5 filas y 8 columnas, con un paso de malla de entre 5 y 10 m. Estas zonas sirven para chequear la exactitud altimétrica y la exactitud del proceso de filtrado de vegetación.

El cálculo del vuelo de calibración supone calcular la trayectoria GPS/INS, calcular los puntos láser de la pista del aeropuerto sobrevolada en pasadas paralelas y pasadas transversales, y realizar un pequeño ajuste con los datos de campo. Luego con el software adecuado se determinan los parámetros de calibración usando los puntos láser en la zona de solape de las pasadas y los puntos de control.

40. 5.2 Tratamiento de datos Lidar

Las coordenadas de los puntos láser se obtienen calculando la trayectoria del avión en el sistema de referencia WGS84 (ETRS89) a partir de los datos GPS/INS recogidos por el avión y de los datos GPS de las estaciones de referencia. Esta orientación directa determina directamente la planimetría, en cambio la altimetría se ajusta con la observación de las áreas de control MDT en campo con la finalidad de compensar los errores sistemáticos de la altitud.

En el cálculo de la trayectoria GPS/INS se trata de combinar, para cada día de vuelo, los datos recogidos como mínimo en dos estaciones de referencia fijas con los del avión, mediante el software cinemático adecuado según el sistema IMU/DGPS de trabajo, realizándose a continuación una integración con los datos inerciales mediante la aplicación del algoritmo de Kalman, de forma que obtenemos los ángulos de orientación (roll, pitch y heading). En este proceso se incorporan los vectores desplazamiento entre los sensores *(offsets*) y rotaciones que relacionan los sistemas de referencia del sensor inercial y el láser, así como la posición de la antena GPS del avión. El resultado final del cálculo es la posición (X, Y, h) y orientación del avión (roll, pitch, heading) en coordenadas UTM y altura elipsoidal sobre WGS84 (ETRS89). La precisión interna que se obtiene en el proceso de cálculo de la trayectoria GPS/INS es del orden de los 10 cm.

El proceso de cálculo y ajuste de los puntos láser está dividido en diferentes procesos. En primer lugar, se calcula un vuelo de calibración al principio y final del proyecto sobre un aeropuerto. Normalmente los puntos láser se calculan mediante el software de aplicación del equipo Lidar utilizado proporcionado por el fabricante. En el cálculo de los puntos láser intervienen los parámetros de calibración, la trayectoria calculada GPS/IMU y los datos láser que en el avión se graban en un disco. En primer lugar se decodifica el disco. En este proceso se traducen los datos recogidos en el avión al formato de trabajo. Una vez decodificada la cinta se obtiene el número de cada una de las pasadas registradas en el disco, los tiempos GPS de inicio y final de cada pasada en formato de semana y hh:mm:ss, el porcentaje de puntos que se han registrado correctamente, la distancia media de los puntos y el ángulo de escáner de cada pasada información necesaria para el cálculo posterior. Seguidamente se realiza un ajuste de los datos láser en altura para acabar con la georreferenciación de los mismos que la proporciona directamente la trayectoria GPS/IMU.

Una vez conocidos todos los puntos, se procede a realizar la clasificación de los mismos es decir, a la separación de la información relevante del resto. Normalmente esta edición se realiza en dos procesos, uno primero automático seguido de otro manual realizado por expertos operadores. Tras aplicar los algoritmos de clasificación se discriminan los elementos (árboles, superficies de agua, edificios…), siendo dicha información clasificada la materia prima para generación de los MDT, entre otros productos.

40.6. Utilización del Lidar en la obtención del MDT y MDS

Los datos obtenidos en el proceso de cálculo Lidar proporcionan distintos tipos de datos. Primeramente una nube de puntos calculados desestructurados y clasificados y no clasificados. Estos datos se pueden tratar con herramientas vectoriales que se pueden convertir a formato raster definiendo tamaño de píxel aplicando método de interpolación por vecino más próximo, máximo o mínimo local etc. Un tercer formato de trabajo lo constituye el formato raster de los puntos con la asignación de la altura y la densidad e intensidad.

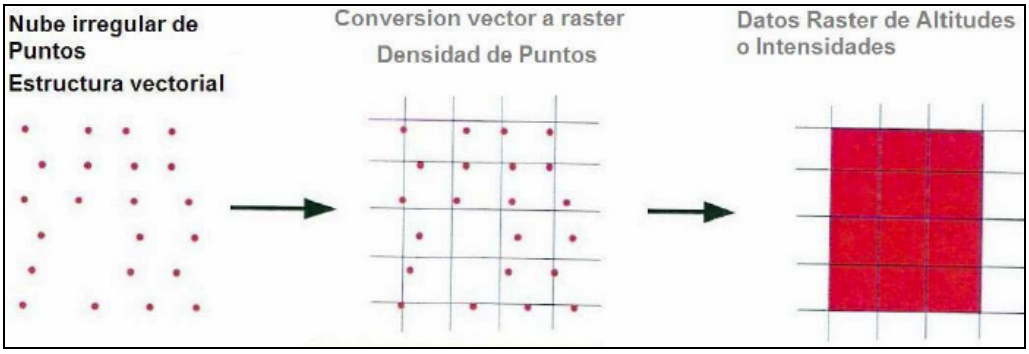


Figura 4. Estructura de datos Lidar

Como se dijo anteriormente dos de las aplicaciones topográficas más usuales de la técnica Lidar son la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Modelos Digitales de Superficie (MDS).

El modelo digital del terreno (MDT) de malla regular con un paso de malla definido se genera a partir del modelo de triángulos de terreno (TIN) realizado con la nube de puntos de la capa terreno a los que se le añaden las líneas de ruptura, tratándose con el software correspondiente y aplicando un método de interpolación (lineal normalmente).

El modelo digital de superficie de malla regular (MDS) con un paso de malla definido se genera a partir de la nube de puntos clasificada con el software especializado en la tarea. Este modelo se realiza con los puntos de la capa "primer eco" tomando el punto más alto dentro de cada celda de trabajo y rellenando los huecos.

Ambos productos se ofrecen en el sistema de referencia WGS84 (ETRS89) proyección UTM con alturas elipsoidales. El formato de los ficheros más común es ASCII de Arc Info (*.txt) aunque también se ofrecen otros estándares como el formato (x,y,h).

40.7. Modelos en 3D

Una de las aplicaciones más relevantes en las que se utilizan los datos obtenidos a través de la técnica Lidar es la generación de modelos en 3D en zonas urbanas. Con la generación de los MDS de zonas urbanas y la visualización tridimensional (3D) de cascos urbanos, se pueden crear este tipo de modelos que ofrecen grandes posibilidades a la hora de realizar localizaciones de elementos. Los campos de aplicación son muy diversos, desde las telecomunicaciones donde se emplean para

localizar antenas sin cable, hasta en la planificación urbana, modelos de microclima urbano o en el estudio de la propagación de ruido y polución.

40.8. Otras aplicaciones

Dentro de las *aplicaciones topográficas*, además de la generación de los modelos digitales del terreno y de superficie, actualmente se está desarrollando otros productos como:

- Cálculo de volúmenes de minas a cielo abierto, diseño y planificación de comunicaciones. Cartografía de vías de comunicación, autopistas, carreteras etc.
- Cartografía de daños ejecutada de forma rápida después de un desastre natural, terremotos, inundaciones, huracanes etc.
- Estudio y planeamiento forestal: adecuados para el inventario forestal, gestión y monitorización de bosques, planificación y mejora de infraestructuras, planeamiento de sistemas de drenaje y fertilización, análisis y estudio del potencial de erosión. Obtención de parámetros forestales como altura de árboles de la diferencia entre el MDS y MDT, diámetros de árboles, densidad y biomasa, determinación de zonas forestales, análisis de riesgos de incendio
- Modelización de cuencas hidrográficas, definición de zonas inundables, perfiles longitudinales y transversales, modelos hidráulicos, definición del límite de dominio público hidráulico. Gestión y monitorización de costas, estudios de evolución de estuarios y deltas, evaluación de daños, estudios de cambios y erosión costera, desplazamiento de dunas, delimitación del dominio público marítimo-terrestre. Levantamientos batimétricos hasta 50 m de profundidad.
- Cartografía y gestión de líneas eléctricas, vectorización e inventario de estas líneas, posicionamiento de pilares, visualización 3D análisis de riesgos de incendio a partir de la generación de un modelo de los cables de las líneas eléctricas.

Además, existe otra serie de aplicaciones de naturaleza diferente como son las de carácter ambiental cuyo objetivo, principalmente, es la determinación de propiedades de la atmósfera. También las hidrográficas o batimétricas, en las que el sistema Lidar utilizado debe ser de máxima potencia y

una longitud de onda determinada para que la señal emitida sea capaz de penetrar la superficie del agua y volver al sensor.

Bibliografía

[1] Papí Montanel, Francisco. Módulo 4: Sensores y Técnicas Avanzadas, curso de Teledetección aplicada a la observación e información territorial. 2006. Instituto Geográfico Nacional.

Tema 41.Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes. Plataformas y sensores. Satélites de observación de la Tierra

41.1. Teledetección y Sistemas de Tratamiento Digital de Imágenes

Dentro del Sistema de Producción Cartográfica se estudia la teledetección como sistema de captura directa, en forma digital, de información a distancia.

El **tratamiento digital de imágenes digitales** será la herramienta fundamental de explotación de dicha información, así como de la integración de los procesos de información y comunicación en las fases de captura, tratamiento y explotación.

41.1.1. Introducción

La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica (MDT, planimetría).

Ello ha sido posible gracias al desarrollo que han experimentado, por un lado, las Técnicas de Tratamiento Digital de Imágenes, lo cual ha facilitado, en todos los procesos, la obtención de datos significativos del territorio y por otro al acceso a la exhaustiva información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

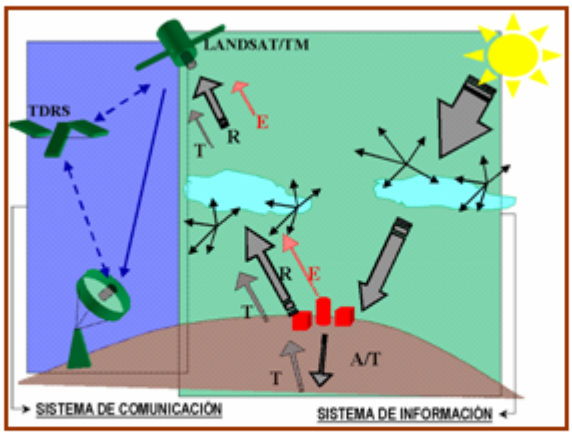


Figura 1. Captura mediante teledetección: sistemas de comunicación y de información.

Como ya se ha indicado anteriormente, la fotogrametría se puede considerar la tecnología precursora de la teledetección. No obstante, para la captura de información desde satélites nos tenemos que remontar al año 1960 cuando la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pone en órbita el primer satélite de la serie TIROS, pionero de los destinados a la observación meteorológica, y en 1972 el ERTS 1 (Landsat 1), comenzando la era de la "Teledetección espacial". En la actualidad hay cientos de satélites de Observación de la Tierra en órbita, cada uno de los cuales porta uno o varios sensores diseñados para un tipo de aplicaciones específico.

Las imágenes de satélite tienen la ventaja de que abarcan una zona mucho mas amplia que las imágenes aéreas, permitiendo realizar estudios territoriales a bajo coste.

En la actualidad los satélites nos proporcionan sistemas integrados de datos territoriales (a partir de la radiación electromagnética transformada en información digital) con gran resolución espacial, radiométrica, espectral y gran periodicidad, que hacen de la teledetección un instrumento indispensable para el conocimiento global de la Tierra, así como para la detección y cuantificación de los cambios que en ella se producen.

El Tratamiento Digital de Imágenes utiliza la información digital (imágenes) procedentes de sensores para la extracción de información específica a los fines requeridos, topográficos y temáticos. Una de sus grandes ventajas es la rapidez de procesamiento de la ingente información digital disponible hoy día para cada proyecto.

Para la obtención de información topográfica y temática se ha venido utilizando, hasta fecha reciente, diferentes sistemas y equipos de producción, con lo que la superposición y correspondencia entre ambas informaciones se hacía difícil, así como un elevado costo en su obtención y actualización.

Para el estudio del Tratamiento Digital de Imágenes se puede dividir, el mismo, en las siguientes fases:

- Concepto de imagen digital.
- Tratamientos previos. Radiométricos y geométricos.
- Mejoras de la imagen.
- Sistemas de Extracción automática de información.

Para finalizar conviene resaltar que las aplicaciones de la teledetección son actualmente muy variadas, prácticamente de aplicación a todas las ciencias y disciplinas del conocimiento de la Tierra, como son: meteorología, ocupación del suelo, geología, edafología, agricultura, estudios forestales, medioambiente, cartografía temática y topográfica, cambio global, análisis geográfico, etcétera.

La teledetección ha propiciado la creación de equipos multidisciplinares que resultan indispensables en la ejecución de cualquier proyecto.

41.1.2. Tratamiento digital de imágenes

El Tratamiento Digital de Imágenes es una parte fundamental de la teledetección, cuyo desarrollo ha impulsado las aplicaciones de los datos digitales procedentes de sensores.

La Imagen en forma digital (matriz numérica bidimensional) obtenida directamente (radiómetros) o por transformación de la imagen analógica (cámaras métricas) en digital mediante escáner, será la fuente indispensable de entrada de datos en el Sistema de Tratamiento.

Asimismo, al ser los datos, en todo el procesamiento, en forma digital posibilita dos aspectos trascendentales en el momento actual, como son:

- La comunicación y transmisión por redes de la información.
- La producción electrónica de documentos cartográficos (mapas, ortofotos, etcétera).

Concepto de Imagen Digital

La **imagen,** de forma genérica, se puede considerar que es un elemento constitutivo indiscutible de todo proceso de transmisión de información (comunicación).

Los primeros elementos que podemos considerar como imágenes (**analógicas**) son los dibujos, gráficos, esquemas, etcétera, los cuales, tanto su confección como su transmisión (reproducción), se realizaban y realizan en ciertos casos, completamente de forma manual.

La complejidad de su ejecución y por tanto de su reproducción variaban sustancialmente, entre otros factores, en función de si la imagen era en blanco y negro o color, dificultando y encareciendo los procesos antes mencionados en función de las características de la imagen.

Este escaso conocimiento de las técnicas asequibles en la utilización del color impidió y frenó durante siglos que el mismo se utilizase regularmente en los procesos de producción de documentos.

La **fotografía**, desde sus orígenes, contribuyó de forma definitiva y eficaz a todos los procesos de producción de documentos y especialmente de imágenes.

Las **técnicas analógicas** de **fotografía, fotomecánica y fotocomposición**, que en algunos casos todavía se siguen utilizando en los procesos productivos, han sido los sistemas inspiradores de los actuales **sistemas digitales** de reproducción y, por supuesto, fotogramétricos.

Una fase fundamental en la producción de imágenes digitales, en aquellos casos que la fuente de información fuese analógica (cámara fotogramétrica), sería la **conversión** de dicha información (señal analógica) en digital mediante convertidores –**ADC**– (cuantificadores y codificadores), como por ejemplo: escáner, digitalizadores, etcétera.

La **cuantificación** tiene por objeto el **muestreo** de la información analógica original y, por tanto, una **discretización** de la misma (función del tiempo o el espacio, en el caso de audio e imagen respectivamente).

La **codificación** (número de bits por muestra) se encargará de hacer reproducible y fácilmente procesable dicha información discretizada, facilitando igualmente su almacenamiento y transmisión.

Todo proceso de cuantificación (convertidores de una señal de entrada en otra de salida según una ecuación dada) lleva consigo una generalización de la información; por ello, pueden considerar a los cuantificadores como sistemas potentes de compresión.

Las **imágenes digitales,** como ya se ha dicho anteriormente**,** son una transformación (discretización) de las imágenes originales fotográficas (analógicas) en digitales mediante un escáner (ADC), o bien son en sí mismas digitales si proceden directamente de un barredor multiespectral (caso de la teledetección) o cámara digital.

En cualquier caso, una imagen digital se puede considerar de forma genérica como una matriz (bidimensional) discretizada en niveles de grises –**ND** (valor radiométrico o digital)– con una expresión, por celda (cada celda/elemento de la matriz se denomina pixel -**s**-), del tipo:

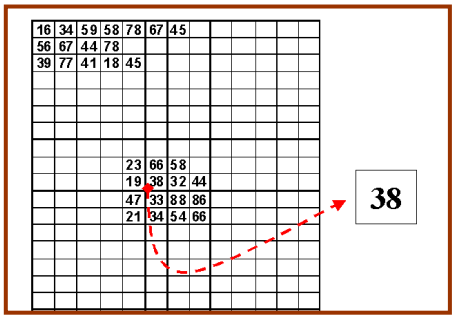


Figura 2. Imagen digital (forma decimal).

$$ND = f(x,y)$$

$$f(x, y) \cong \begin{vmatrix} f(0, 0) \ldots\ldots\ldots\ldots & f(0, M-1) \\ . & . \\ . & . \\ . & . \\ f(M-1, 0) \ldots\ldots\ldots\ldots & f(M-1, M-1) \end{vmatrix}$$

Imágenes de M x M pixeles (M filas y M columnas)

Cada pixel representa un valor de la **radiación electromagnética total reflejada – Q –** por cada pixel en un instante dado.

ND = f(x, y)=f (energía radiante recibida –Q-) = i (x, y). r (x, y)

Siendo:

i (x, y) = f (iluminación) $0 < i < \infty$

r (x, y) = f (reflectancia del objeto) $0 < r < 1$

Su tamaño tendrá que ver, asimismo, con la resolución espacial (espaciamiento muestral) de la imagen. En imágenes escaneadas se expresa por **- spi –,** pixeles por pulgada.

41.1.3. Sistemas de captura de información a distancia

Los sistemas de captura de información a distancia, son aquellos en los que el objeto del cual se quiere obtener información (carreteras, cultivos, núcleos de población, etc.) no se encuentra en contacto directo con el propio sistema de captura. Son ejemplos característicos de técnicas de captura a distancia, la fotogrametría y la teledetección que se estudian a continuación.

Para definir estos sistemas se hace necesario el estudio previo de aquellos **principios físicos** que rigen dicha captura, así como, los sistemas existentes mas característicos, como son las **plataformas** que transportan los **sensores** encargados de la captura, transformación y almacenamiento o envío de la información a la tierra.

41.1.4. Principios de la captura de información a distancia

Los elementos fundamentales de la captura de información a distancia son: la radiación electromagnética, las leyes físicas que actúan en el proceso (dispersión, absorción, reflexión, etc.), el objeto a capturar y sus propiedades, el sensor y el tipo de registro de la información.
En el siguiente cuadro se muestran las diferencias fundamentales existentes entre los sistemas de captura utilizados en la fotogrametría y en la teledetección.

	FOTOGRAMETRÏA	**TELEDETECCIÖN**
Plataforma	Avión	Satélite
Sensor	- Cámara métrica analógica (fotográfica)	- Barredores multiespectrales digitales (radiómetros)
Registro de la Información	- Película fotográfica + Procesos químicos de revelado y fijado	- Transformación y conversión de la información analógica (Q_i) en digital + Transmisión a estaciones terrestres de seguimiento y procesado

Tabla 1. Diferencias fundamentales existentes entre los sistemas de captura utilizados en la fotogrametría y en la teledetección

Nota: En un futuro próximo se introducirán en el mercado las cámaras métricas digitales que sustituirán a las actuales cámaras analógicas, acercando aún mas las técnicas empleadas en fotogrametría y teledetección.

En el caso de la **fotogrametría**, el proceso de captura se realiza de acuerdo al procedimiento fotográfico convencional: la energía (radiación electromagnética – Q_i) reflejada, procedente del Sol, mas la emitida o transmitida por los objetos (en menor cuantía) incide en diferente forma y valor en cada uno de los puntos del territorio y por tanto en la emulsión fotográfica (cristales de bromo B_r^- y plata Ag^+). Posteriormente se producen mediante las ecuaciones clásicas de revelado y fijado, la obtención de la imagen "copia" del objeto fotografiado.

Las ecuaciones fundamentales que se producen en el proceso de insolación fotográfica son:

$$\mathbf{B_r^- + Q_r = B_r^0 + e^-}$$

Posteriormente los electrones ($\mathbf{e^-}$) reaccionarán con los cristales de plata para obtener la plata metálica (imagen latente):

$$Ag^+ + e^- = Ag^0$$

Los bromuros de plata no afectados por la radiación son disueltos y la imagen fijada (lavado fotográfico).

Las imágenes fotográficas más empleadas utilizan películas sensibles a la radiación electromagnéticas correspondiente a longitudes de onda que se encuentran entre los 420 nm a 700 nm, que se conoce normalmente como **espectro visible**, dentro del dominio óptico del espectro (películas pancromáticas, B/N y color). En algunas aplicaciones especiales se utilizan películas con diferentes emulsiones sensibles a otras longitudes de onda: pequeña longitud de onda (Rayos X) en medicina o con mayor longitud de onda (infrarrojo) en estudios medioambientales.

La diferencia fundamental entre las imágenes fotográficas y las **imágenes digitales** (imágenes discretizadas en niveles), que posteriormente se abordan, es la de considerar a las primeras como **imágenes continuas**. Este concepto es relativo, debido básicamente a que una imagen fotográfica es continua a escala macroscópica, mientras que a escala molecular (tamaño de los cristales de plata) sería igualmente una imagen discreta. La sensibilidad de la película nos condicionará unos cristales mas o menos gruesos en función de ser mas o menos sensibles.

Esta sensibilidad estará relacionada con la **resolución** espacial de la película y por tanto con la escala adecuada de trabajo. Cuanto mayor sea la sensibilidad menor será la resolución de la película.

La sensibilidad de la película condicionará, por tanto, la máxima resolución que podría ser escaneada en el proceso de conversión analógico/digital. La resolución de las películas fotográficas se expresan normalmente en **líneas por milímetro o pulgada (lpm - lpp).**

Las películas fotográficas, especialmente para sensibilidades pequeñas y medias, suelen tener una resolución muy superior a la agudeza visual del ser humano (0,2 mm), lo que evita ser, normalmente, un condicionante en la escala final del documento cartográfico de trabajo.

Para la obtención del color y su posterior reproducción, conviene recordar algunos conceptos básicos.

Sistemas fundamentales de representación de colores:

- **Modelo de color aditivo:** para su obtención se parte del color negro (ausencia de colores primarios) y por adición (en partes iguales) de los colores rojo (R), verde (V) y azul (A) obtendríamos el blanco. Este modelo está basado en las teorías de C. Maxwell desarrolladas en 1861. Este modelo es el empleado en los sistemas que utilizan fuentes de luz (proyectores, monitores, etc.). El modelo aditivo dará origen a las **técnicas multiespectrales.**

- **Modelo de color sustractivo:** partiendo del color blanco, vamos "restando colores" añadiendo las tintas básicas fundamentales, amarillo (Y), magenta (M) y cian (C). Esta combinación se conoce como **tricomía.** Las tintas en este contexto actuarían como auténticos filtros de la luz (sustracción), absorbiendo el color complementario y **reflejando** el resto, que al incidir sobre los conos de la parte interna de la retina nos formarían, por adición, el color definitivo. Esta mezcla de tintas puras en partes iguales nos dará, por tanto, el negro. Como es difícil obtener tintas puras, lo que realmente se obtiene es un gris oscuro (falta de contraste), el problema se soluciona añadiendo una nueva tinta, negro (K), a la tricomía anterior. El nuevo modelo se conoce como **cuatricomía**, siendo el sistema normal de reproducción en litografía, así como, en las impresoras que utilizamos en los equipos informáticos. El modelo sustractivo dará origen a las **técnicas multicapa.**

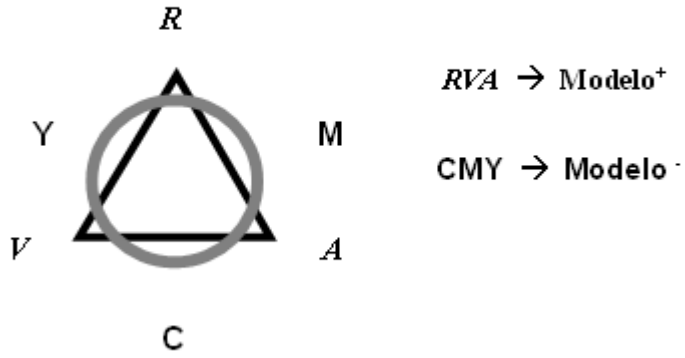


Figura 3. Esquema de representación (complementaria) de ambos Modelos

Finalmente conviene resumir la característica fundamental, en la **observación** por parte del ser humano, de los **modelos cromáticos** más empleados:

- En la naturaleza existen mas de 16 millones de colores.
- En los monitores utilizando el modelo aditivo RVA con 8bits por pixel, existen 16 millones de colores.
- En los sistemas de impresión el modelo sustractivo CMYK se emplean menos de16 millones de colores.

Los modelos cromáticos definirán un **espacio cromático** en el que se desarrollarán los sistemas de **medida del color** con vistas a su manipulación y normalización (Cubo de Hickethier, Triángulo CIE, Cono de Ostwald, Sólido de Munsell, Gama Pantone, etcétera.).

En el caso de la **teledetección**, los sensores encargados de capturar información del territorio, al igual que en fotogrametría, la reciben en forma de "energía radiante" (Q_i) que una vez transformada en formato digital es reenviada a la Tierra para su posterior tratamiento digital.

La transmisión desde el satélite se puede realizar en "tiempo real" a la estación de recepción de la Tierra o en tiempo diferido a satélites de comunicación (TDRS) que posteriormente la transmitirán a la Tierra.

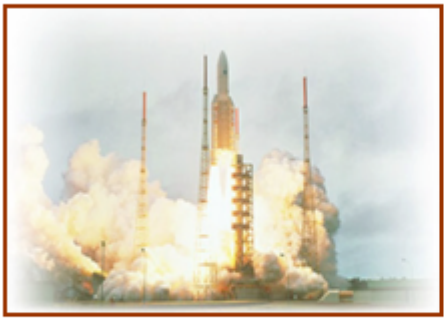


Figura 4. Lanzadera espacial

Figura 5. Estación terrestre de seguimiento de satélites

Esta "energía radiada" en todas direcciones la representaremos por Q_i y se mide en julios (J).

El proceso de emisión, transmisión y captura de esta energía radiante puede resumirse de la siguiente forma:

- **Emisión.** Todos los cuerpos con temperatura superior a cero grados absoluto (0º K = -273º C) emiten una radiación electromagnétic (r.e.) de diferentes longitudes de onda (λ_i) (Planck). Esta (r.e.) es una forma de transferencia de energía (Q_i)en el espacio libre. (Hunt).

- **Transmisión.** La energía se transmite a la velocidad de la luz (c = $3{,}10^8$ m/s) con movimiento ondulatorio armónico y propiedades de onda y de corpúsculo. Esta Q_i se verá alterada tanto por atravesar la atmósfera, como en su interacción (reflexión, refracción) con los diversos objetos con los que intercepta.

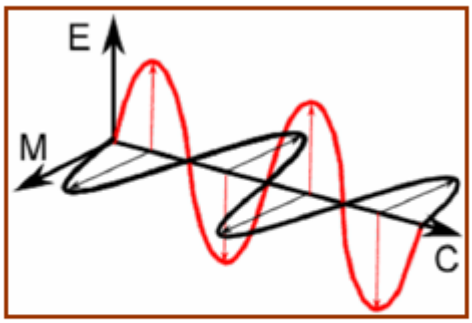


Figura 6. Transmisión de la energía en el espacio.

- **Captura.** La energía recibida en el sensor, es por tanto la Q_{iT} resultante en todos los procesos físicos anteriormente enumerados, por unidad de superficie captada (pixel).

Nota: hoy día, es factible pasar de la fotografía comercial analógica a la digital, mediante conversores adecuados (ADC) – escáner – . Ello dará lugar a la fotogrametría digital con técnicas similares a las empleadas en teledetección.

41.2. Plataformas y sensores

Un **sensor** es el instrumento encargado de la captura, registro y almacenamiento de la información territorial en forma de energía radiante – Q_i – o radioeléctrica (radar).

El mismo sensor, en los casos en que su registro sea digital, llevará incorporado los sistemas de transformación de información analógica (energía) en digital (convertidores analógicos /digitales).

Los sensores son transportados sobre diversas **plataformas**, dependiendo de la finalidad de la misión espacial. Sobre la misma, incorporan no solo los sensores correspondientes, si no también los instrumentos necesarios en cada misión (sistemas de posicionamiento espacial–GPS-, sistemas inerciales para la medida de ángulos del eje del sensor en el espacio , sistemas de comunicación, etc.).

Como ya se ha indicado, en los sistemas de captura de las información a distancia, se hace necesario poner la plataforma/sensor a la distancia adecuada de la Tierra para el posterior registro de la información. En el caso de la **fotogrametría**, esto se realiza de forma autónoma, donde es la propia plataforma (avión) la que consigue dicho posicionamiento solo con adquirir la altura (normalmente menor de 10 km) y la orientación planificada en el espacio. En el caso de la **teledetección**, dicha plataforma/sensor se posiciona en su órbita espacial adecuada (para satélites de observación de la Tierra la mayoría se encuentran entre los 200 – 40.000 km), mediante la utilización de **lanzaderas** espaciales (Ariane, Géminis, Apolo, Europa, SpaceShuttle, etc.).

Dichos sensores, de acuerdo con el siguiente cuadro, se pueden clasificar para su estudio, en función tanto de la capacidad o no de obtener imágenes del territorio, como de la parte del espectro electromagnético (longitud de onda) que registren:

CAPTURA DE INFORMACIÓN: SENSORES
FORMADORES DE IMAGEN **ACTIVOS** ***(ELECTRÓNICOS)*** **- RADAR** - SAR (SYNTETHIC APERTURE RADAR) - SLAR (SIDE LOOKING AIRBORNE RADAR) **PASIVOS** ***(ÓPTICOS)*** **- OJO HUMANO** **- CÁMARA FOTOGRAMÉTRICA** **- CÁMARA DE TELEVISIÓN** ***(ELECTROÓPTICOS)*** **- RADIÓMETROS (BARREDORES MULTIESPECTRALES):** - MECÁNICOS (DETECTORES SÓLIDOS) - ELECTRÓNICOS (CCD) **- RADARES PASIVOS**
NO FORMADORES DE IMAGEN **ACTIVOS** **- LASER** **- RÁDARES ALTIMÉTRICOS** **- DISPERSÓMETROS** **PASIVOS** **- RADIÓMETROS TÉRMICO**

Hay que destacar que tanto la energía radiante almacenada en cada pixel en forma digital (correspondiente a una determinada resolución espacial sobre el terreno), como el volumen (Mbytes) de información capturado por escena, se realizará de forma distinta según la tecnología aplicada.

Por ello, se revisan a continuación los dos tipos de sensores mas empleados en teledetección:

- **Sensores activos.** La resolución espacial será función del **ancho de haz** emitido por el sensor y del ángulo de incidencia sobre el terreno. El volumen de información

será función asimismo del **ancho del barrido** lateral, programable según las necesidades requeridas.

- **Sensores pasivos.** La resolución espacial es función del campo de visión instantánea - α - (IFOV). El volumen de información será función del ángulo total de observación - β - (FOV).

A continuación, se describirán las características de los sensores "formadores de imágenes" más importantes hoy día en el mercado, según su utilidad y accesibilidad.

Los sensores no formadores de imágenes, fundamentalmente nos proporcionan datos discontinuos del terreno, que serán de utilidad como entrada básica para estudios específicos (modelos) medioambientales (alturas, temperaturas, composición atmosférica, etc.) entre otros estudios del medio físico.

41.2.1. Sensores activos formadores de imágenes

Se definen como sensores **activos**, aquellos que la energía que se capta y registra es la correspondiente a la emitida por el propio sensor, normalmente en la zona de las microondas (longitudes mayores de 1 cm) y a una frecuencia determinada.

Como sensores activos formadores de imágenes que actualmente existen en el mercado caben destacar los siguientes:

- ERS (Earth Resource Satellite). Unión Europea.
- RADARSAT. Canadá, USA.
- JERS (Japanese Earth Resource Satellite). Japón.

Todos ellos captan información en la zona de las microondas y utilizan tecnología radar. Los **radares de apertura sintética** (SAR) utilizan el propio movimiento del satélite y tecnología Doppler (cambios de frecuencia en la emisión de los pulsos eléctricos) para **sintetizar** la gran antena necesaria en la adquisición de imágenes de alta resolución espacial. Ello es debido a que en esas grandes longitudes de onda (> 1 cm) de emisión, para captar su energía se necesitaría o bien unidades espaciales (pixeles) muy grandes (varios kilómetros) o antenas de gran tamaño. La solución es obtener una antena sintética, simulando grandes dimensiones, como se ha indicado anteriormente.

Asimismo, la gran ventaja de la tecnología radar es que al utilizar energía de gran longitud de onda, la penetración atmosférica no está condicionada por unas "ventanas" tan rígidas como sucede en el caso del espectro "óptico" y puede registrar información sin tener en cuenta las condiciones atmosféricas de la Tierra.

Una imagen radar, comprende una única banda espectral, que se corresponde con la relación de la energía emitida por el sensor y la reflejada directamente en la Tierra y captada posteriormente por el sensor. Esto se conoce como **retrodispersión**.

La retrodispersión de una zona determinada depende de: la topografía, rugosidad y propiedades dieléctricas del terreno (contenido de humedad) y del ángulo de incidencia (relación angular entre la dirección del haz y la vertical del lugar en la superficie del terreno). Valores digitales bajos (ND ≅ 0), corresponde a tonos oscuros.

- **Radiometría radar.**
    - Las imágenes radar proporcionan una valiosa información del territorio en la zona de las microondas, siendo de gran utilidad en los estudios geológicos, agrícolas-forestales, cartográficos, etc. Una características general de estas imágenes es que las zonas húmedas, por un bajo nivel de retrodispersión, serán zonas oscuras y las zonas urbanas, esencialmente brillantes por el incremento de energía reflejada por las propias construcciones (actúan como meros reflectores).

- **Geometría radar.**
    - Debido tanto al propio sistema de captura como a la forma de la Tierra, no se puede registrar, sin distorsión, la superficie de la misma. Como el sensor mide el retardo entre la transmisión y recepción de cada pulso eléctrico, ello implica que existan, en un instante dado, **inversiones** en el registro de cada pulso según se produzca el retorno desde la cima o desde la base de una montaña (fenómenos de "escorzo" e "inversión" de datos).

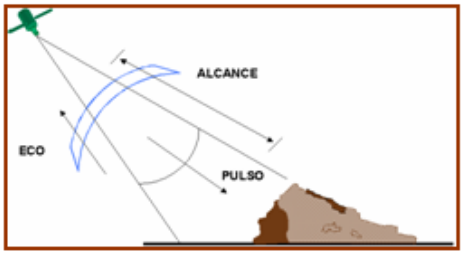


Figura 7. Sistema radar

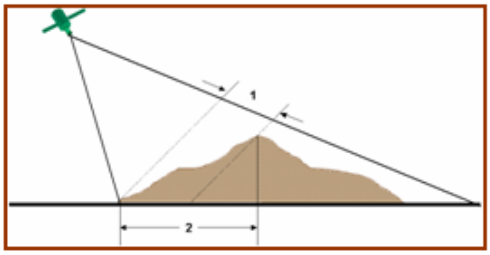


Figura 8. Escorzo

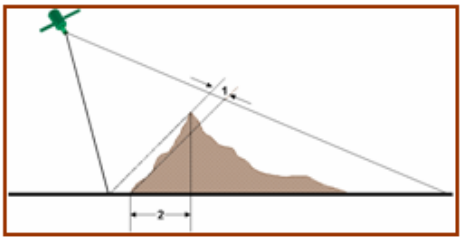


Figura 9. Inversión por relieve

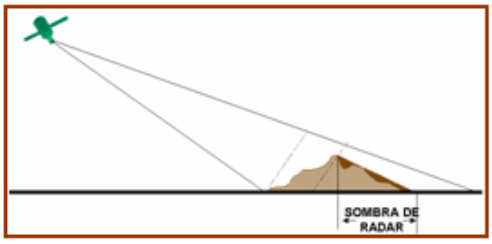


Figura 10. Sombra

Asimismo, se pueden producir **sombras** (zonas no registradas) en las zonas ocultas a la radiación emitida.

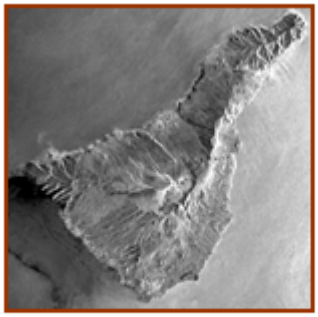


Figura 11. Imagen Radarsat de Tenerife.

41.2.2. Sensores pasivos formadores de imágenes

En los sensores **pasivos**, la energía que se capta y registra, es la correspondiente a la emitida por el Sol fundamentalmente y reflejada por los objetos sobre la Tierra. Se registra, de acuerdo a las correspondientes partes del espectro electromagnético, desde 0,4 μm (VIS) hasta las zonas de mayor longitud de onda dentro del óptico, 15 μm (TIR). Es necesario que en las zonas espectrales a registrar existan las **ventanas atmosféricas** adecuadas para que la atenuación de la energía radiante sea la menor posible (ruido atmosférico).

Estos sensores son los que actualmente ofrecen un mayo número de imágenes de la Tierra con diversas resoluciones espaciales (desde 1m hasta 1 km), espectrales (de 0,4 hasta 15 μm) y radiométricas (de 6 hasta 12 bits/pixel), así como, un gran número de coberturas en diferentes fechas (lo que posibilita el análisis de detección de cambios).

El origen de estos sistemas se encuentra en la fotografía aérea, cuyo precursor se puede considerar a Gaspar Félix de Tournachon en 1858 , que desde un globo aerostático captó imágenes fotográficas del terreno. Continuada con las diversas tomas fotográficas que desde aviones se realizaron con cámaras fotogramétricas y fines militares a lo largo de todo el siglo XX. Por este motivo, se puede considerar a la fotogrametría como la tecnología precursora de los sistemas espaciales de observación de la Tierra.

La **cámara fotogramétrica** es el sistema actual analógico más empleado en la observación "**métrica**" de la Tierra. Dicho sistema se encuadra dentro de los sensores pasivos formadores de imágenes, cuyo sistema de observación se realiza mediante dispositivos ópticos.

La cámara fotogramétrica sería el sensor que registra la información (Q_i) sobre una película fotográfica con una emulsión dada. La plataforma sería, como ya se ha indicado, el propio avión.

Dentro de los sensores pasivos formadores de imagen, sistemas que utilizan tecnología electroóptica, se encuentran los "**radiómetros**" (mecánicos o electrónicos), que son barredores multiespectrales que registran la energía radiante (Q_i) en diversas partes del espectro electromagnético.

Los radiómetros son los sensores más empleados para el análisis cualitativo y cuantitativo en estudios medioambientales. Constan fundamentalmente de un "**espectrómetro**" que se encarga de registrar la energía separándola según bandas (λ_i) y un "**convertidor**" de la señal analógica (señal eléctrica) en digital (imagen binaria) y posterior codificación.

Los dos tipos más característicos de radiómetros existentes son:

Radiómetros mecánicos (detectores sólidos)

El ejemplo más característico son los empleados por las plataformas Landsat: Thematic Mapper (TM) y Multispectral Scanner (MSS).

Dicho tipo de radiómetros constan de :

- Espejo oscilante (barredor) normal a la traza del satélite.
- Un número determinado de detectores/banda (espectómetro).
- Convertidor analógico/digital compuesto por:
  - Muestreador en función del ángulo unitario IFOV.
  - Codificador en f(número de bits/pixel).

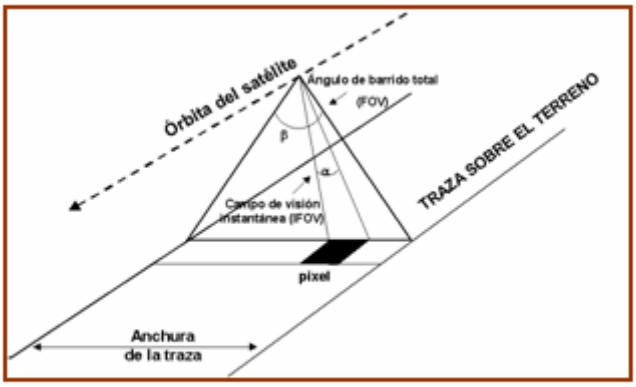


Figura 12. Radiómetro mecánico.

El IFOV (≡ resolución espacial) registrará unidades mínimas de muestreo que se llaman pixeles (s).

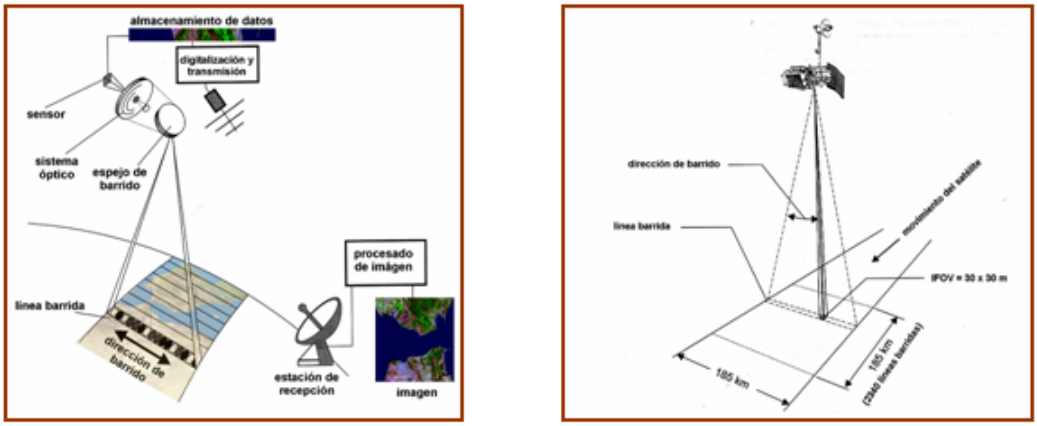


Figura 13. Sistema de captura mediante radiómetro mecánico.

Radiómetros electrónicos (CCD)

Es el sistema empleado por el sensor HRV (High Resolution Visible) de las plataformas SPOT. En este caso, la captura se realiza mediante sistemas de transferencia de carga (CCD), barras estáticas que alojan miles de detectores en dirección perpendicular a la traza del satélite. Las plataformas SPOT tiene dos modos de captar la información de manera simultánea:

- Pancromático (en la parte del visible del espectro electromagnético).
- Multiespectral (3 zonas del IR).

En este caso, el IFOV y el volumen de información es función del número de detectores existentes en la barra portadora. Abatiendo (girando unos ángulos predeterminados) los sensores, se pueden capturar información estereoscópica del terreno , que posibilitarán la obtención de altimetría.

Los programas de observación de la Tierra desde satélites artificiales se pueden considerar que tienen su inicio en 1972 con el programa ERTS (Earth Resources Technology Satellites), que posteriormente, coincidiendo con el lanzamiento del segundo satélite Landsat-2 en 1975, se rebautizó con el nombre de Landsat-1. Desde 1999, la serie se ha completado con el Landsat-7, cuyas características generales son similares a los de la primera serie, pero con grandes mejoras en su aspecto espacial, radiométrico y espectral.

Un gran hito en el mundo de la teledetección se produjo en 1986 con el lanzamiento del satélite SPOT-1 (Systeme Pour l´Observation de la Terre) cuya resolución (10m), su sistema de observación (electrónica – CCD) y su capacidad estereoscópica, revolucionó la observación periódica de la Tierra.

Actualmente, la tecnología nos proporciona imágenes de gran resolución espacial (1m Ikonos), estereoscópica (SPOT, Ikonos) e hiperespectral (gran número de bandas).

41.3. Satélites de observación de la Tierra

Según el tipo de órbita, los satélites se pueden clasificar en:

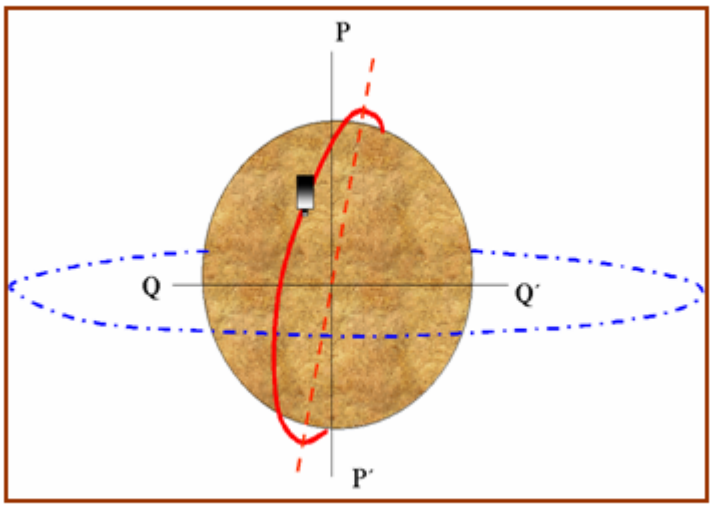


Figura 14. Tipos de órbita: geoestacionaria y polar.

Geoestacionarios(geosíncronos)

Son aquellos que por su altura (36.000 km) y período orbital (igual a la velocidad de rotación de la Tierra), consiguen que su apariencia sobre la superficie terrestre (horizonte del lugar) parezca fija.

Estas órbitas son ecuatoriales y proporcionan observaciones de gran repetitividad y baja resolución espacial (pixeles aproximados al kilómetro).

Son ejemplos los satélites meteorológicos existentes: ATS (Applications Technology Satellite), GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), METEOSAT, ...

Se consideran sincronizados con el Sol, dado que la relación angular entre el Sol y el plano orbital del satélite es constante. Esto implica que el paso del satélite (sensor) por un punto de la superficie terrestre se realiza a la misma hora solar. Las órbitas descritas suelen ser circumpolares con dirección Norte-Sur, alturas próximas a los 1.000 km y períodos pequeños (< 2 h). Propician mayores resoluciones espaciales (< 100 m de tamaño de pixel). Los satélites característicos de esta serie, tanto activos como pasivos, son: Landsat, SPOT, IRS-C, ERS, JERS, Radarsat, ...

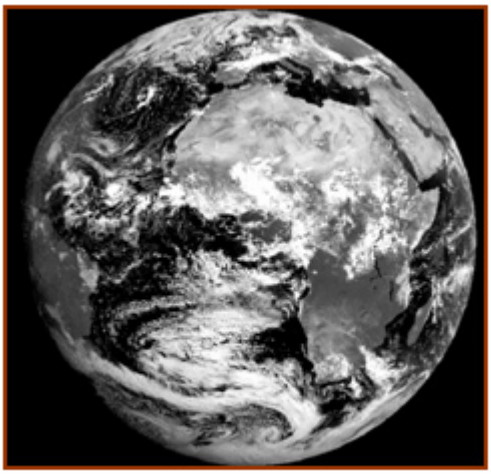


Figura 15. Imagen Meteosat de África y sur de Europa

Órbita general

Se proyectan para fines concretos(atmosféricos, oceánicos, etc.) a alturas e inclinaciones orbitales específicas diferentes de los descritos anteriormente. Es un ejemplo característico la serie Seasat (con fines oceánicos) de los Estados Unidos.

A continuación se describen las características más relevantes de aquellos satélites artificiales existentes de observación de la Tierra, tanto con fines cartográficos, como medioambientales.

Sistemas Activos de Microondas

Sensor	Plataforma	Rango Espectral	Número de bandas	Resolución m	Tamaño Imagen km	Ciclo de repetición	Periodo de cobertura	Fecha de lanzamiento
AMI-SAR	ERS 1 ERS 2	C-BND-VV	1	25m	100km	35 días	16 días	1991 1995
SAR	RADARSAT	C-BND-HH	1	6 a 28 m	50 a 150 km	24 días	2-5 días (0^oLat) 1-1.5 días (50^oLat)	1995
ASAR	ENVISAT	BND	2	30 a 150 m	56 a 406 km	35 días	3 días	

Sensores Ópticos de Alta Resolución

Sensor	Plataforma	Rango Espectral	Número de bandas	Resolución	Tamaño Imagen km	Ciclo de repetición	Periodo de cobertura	Fecha de lanzamiento
TM	Landsat 4,5	VIS, NIR SWIR TIR	4 2 1	30 m 30 m 120 m	183 km	16 días	16 días (0^o Lat) 8 días (60^o Lat)	10982/84
MSS	Landsat 4,5	VIS NIR	4	79 m	185 km	16 días		1982/84
ASTER	EOS-AM1	VIS, NIR SWIR	3 6 5	15 m 30 m 90 m	60 km		16 días	1998

		TIR						
ETM	**Landsat 7**	**VIS, NIR SWIR TIR**	**4 + 1 2 1**	**30/15 m 30 m 60 m**	**183 km**	**16 días**	**8 días (60º Lat)**	**1999**
LISS-III	**IRS-1C IRS-1D**	**VIS, NIR SWIR**	**3 1**	**23.5 m 70.8 m**	**142 km 148 km**	**24 días**	**5 días**	**1996 1997**
PAN	**IRS-1C IRS-1D**	**VIS**	**1**	**5.8 m**	**70.5 km**	**24 días**	**5 días**	**1996 1997**
HRV-XS	**SPOT 1-3**	**VIS NIR**	**3**	**20 m**	**60 km**	**26 días**	**2.4 días(Lat. media)**	**1986**
HRV-P	**SPOT 1-3**	**PAN**	**1**	**10 m**	**60 km**	**26 días**	**2.4 días(Lat. media)**	**1986**
HRV-XI	**SPOT 4**	**VIS, NIR SWIR**	**3 1**	**20 m**	**60 km**	**26 días**	**2.4 días(Lat. media)**	**1998**
HRV-P	**SPOT 4**	**PAN**	**1**	**10 m**	**60 km**	**26 días**	**2.4 días(Lat. media)**	**1998**
KVR-1000	**KOSMOS**	**PAN**	**1**	**2-3 m**	**40 x 40 km^2**			**1984**
TK-350	**KOSMOS**	**PAN**	**1**	**10 m**	**200 x 300 km^2**			**1981**
Cartera	**Ikonos 1**	**PAN VIS, NIR**	**1 4**	**1 m 4 m**	**11 km**		**1 día (con Ikonos 2)**	**1999**

Sensores Ópticos de Resolución Media

Sensor	Plataforma	Rango Espectral	Número de bandas	Resolución m	Tamaño Imagen km	Ciclo de repetición	Periodo de cobertura	Fecha de lanzamiento
WiFS	IRS-1C IRS-1D	VIS NIR	2	188.3 m	810 km	16 días	5 días	1996 1997
AVHRR	NOAA-POES 9-14	VIS, NIR MWIR TIR	2 1 2	1100 m	2400 km		12 horas	1982
AVHRR/3	NOAA-K(15)	VIS, NIR SWIR,MWIR TIR	2 2 2	1100 m	3000 km		12 horas	1998
MSU-SK	Resurs-01 #3	VIS, NIR TIR	4 1	170 m 600 m	600 km	14 días	4 días (0°Lat) 2días(50°Lat)	1994
MSU-SK1	Resurs-01 #4	VIS, NIR SWIR TIR	4 1 1	225 m 810 m 810 m	714 km	16 días		Julio 1998
MODIS	EOS-AM!/PM!	VIS NIR SWIR TIR	36	250-1000m	2330 km		< 2 días	Fin 1998
MERIS	ENVISAT-1	VIS NIR	15	300 m (1200 m)	1150 km		- 3 días	

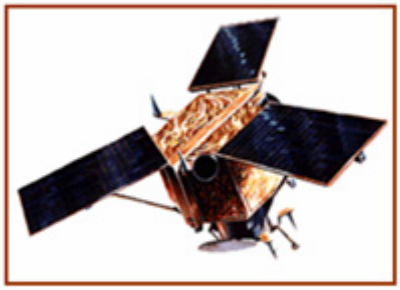


Figura 16. Satélite ikonos

Imagen del satélite Ikonos (1m de resolución). Spaceimaging.

41.4. Catalogo de plataformas y sensores

Source: CEOS Yearbook 95

Mission (Agency)	**Status**	**Launch date/ Duration**	**Orbit details**	**Instruments**	**Primary application areas**
LAGEOS (NASA)	In service	May 1976 10,000	101 deg inclination, 6000km	Laser cornercube reflectors	Geodesy, crustal motion and gravity field measurements by laser ranging
LANDSAT 5 (NOAA)	In service	March 1984 13 years 6 months	Near polar, sun synchronous, crossing 0945h LST, 705km, 99 mins, 16 days	MSS, TM	Land surface, Earth resources
NOAA 9 (NOAA)	In service	December 1984 12 years 9 months	Polar, sun synchronous, crossing 1015h LST crossing, 843km	ARGOS, AVHRR/2, ERBE, HIRS/2, MSU, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM, SSU	Meteorology, Agriculture and forestry, Environmental monitoring, Climatology, Physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search and Rescue
SPOT 1 (CNES)	In service	February 1986 13 years 10 months	Sun synchronous, 1031h LST, 832km, 101 mins, 26 days	HRV	Cartography, land surface, agriculture and forestry, civil planning and mapping, digital terrain models, environmental monitoring
GOES 7	In	February	Geostationary	DCS, S&R	Meteorology, atmospheric

(NOAA)	service	1987 10 years 7 months		(GOES), SEM, VISSR and VAS (GOES-7), WEFAX	dynamics, land surface, space environment, search and rescue, data collection, WEFAX (weather facsimile service)
IRS 1a (ISRO)	In service	March 1988 9 years 6 months	Sun synchronous, 904km, 103 mins, 22 days	LISS I, LISS II	Land surface, agriculture and forestry regional geology, land use studies, water resources, vegetation studies, coastal studies and soils
NOAA 11 (NOAA)	In service	September 1988 9 years	Polar, sun synchronous, pm crossing, 846km	ARGOS, AVHRR/2, HIRS/2, MSU, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM, SSU	Meteorology, Agriculture and forestry, Environmental monitoring, Climatology, Physical oceanology, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search & Rescue
GMS-4 (NASDA)	In service	September 1989 8 years	Geostationary	VISSR (GMS4)	Meteorology
SPOT 2 (CNES)	In service	January 1990 9 years 11 months	Sun synchronous, crossing LST 10:31, 832km, 101 mins, 26 days	DORIS, HRV	Cartography, land surface, agriculture and forestry, civil planning and mapping, digital terrain models, environmental monitoring
NOAA 12	In	May 1991	Near polar,	ARGOS,	Meteorology,

(NOAA)	service	6 years 4 months	sun synchronous, am crossing, 813km, 101.3 mins	AVHRR/2, HIRS/2, MSU, SEM	agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search & Rescue
ERS-1 (ESA)	In service	July 1991 8 years	Near circular, sun synchronous, 782-785km, 100 mins, 3, 35, 176 days	AMI - SAR image mode, AMI - SAR wave mode, AMI - Scatterometer mode, ATSR, MWR, RA	Earth resources plus physical oceanography, ice and snow, land surface, meteorology, geodesy/gravity, environmental monitoring
IRS 1b (ISRO)	In service	August 1991 6 years 1 month	Sun synchronous, 904km, 103 mins, 22 days	LISS 1, LISS II	Land surface, agriculture and forestry regional geology , land use studies, water resources, vegetation studies, coastal studies and soils
METEOR-3 N5 (ROSHYDROMET)	In service	August 1991 6 years 1 month	Near polar, 81-83 deg, 1200km, 109.4 mins	174-K, MR-2000M, MR-900B, RMK-2,	Agriculture and forestry, atmospheric dynamics/water and energy cycles,

				SFM-2	climatology, environmental monitoring, hydrology, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology, space environment
UARS (NASA)	In service	September 1991 6 years	57 deg inclination, 600km, 97 mins, 36 days	ACRIM II, CLAES, HALOE, HRDI, MLS (UARS), PEM, SOLSTICE, SUSIM, WINDII	Atmospheric chemistry (middle to upper atmosphere), atmospheric dynamics/water and energy cycles Research mission
JERS 1 (NASDA)	In service	February 1992 5 years 7 months	Sun synchronous, 568km, 96 mins, 44 days	OPS, SAR	Earth resources Land surface
INSAT IIa (ISRO)	In service	July 1992 9 years 1 month	Geostationary	BSS & FSS transponders, SRT-S&R, VHRR	Meteorology, data collection and communication, search and rescue
TOPEX/ POSEIDON (NASA)	In service	August 1992 7 years	Non sun-synchronous, 66 deg inclination, 1336km, 112 mins 25.8 sec, 9 days, 21 hours 58 mins 32 secs	ALT, DORIS, GPSDR, LRA, POSEIDON (aka SSALT), TMR	Physical oceanography, geodesy/gravity
LAGEOS II	In	October	52 deg	Laser	Geodesy, crustal

(NASA)	service	1992 10000 years	inclination, 5900km	cornercube reflectors	motion and gravity field measurements by laser ranging
MECB SCD-1 (INPE)	In service	February 1993 3 years	25 deg inclination, 750km, 100 min	DCP	Data collection and communication
INSAT Iib (ISRO)	In service	July 1993 7 years	Geostationary	BSS & FSS transponders, SRT-S&R, VHRR	Meteorology, data collection and communication, search and rescue
METEOR-2 N24 (ROSHYDROMET)	In service	August 1993 4 years 1 month	82.5 deg inclination, 900km, 102.5 mins	MR-2000, MR-900, RMK-2	Land surface, physical oceanography, atmospheric dynamics/water and energy cycles
STELLA (CNES)	In service	September 1993 10,000 years	Circular, 98 deg inclination, 830km	Laser reflectors	Geodesy/gravity Study of the Earth's gravitational field and its temporal variations
METEOSAT 6 (EUMETSAT)	In service	November 1993 8 years 7 months	Geostationary	MVIRI	Meteorology, climatology
GOES 8 (NOAA)	In service	April 1994 5 years	Geostationary	DCS, IMAGER, S&R (GOES), SEM, SOUNDER, WEFAX	Meteorology (primary mission), search and rescue, space environment monitoring, data collection platform, data gathering, WEFAX

IRS P2 (ISRO)	In service	October 1994 3 years	Sun synchronous, 817km, 101.35 mins	LISS II	Land surface, agriculture and forestry, regional geology, land use studies, water resources, vegetation studies, coastal studies and soils
Ocean-01 N7 (ROSHYDROMET)	In service	October 1994 4 years	Near polar, 82.6 deg inclination, 650km, 98 mins	KONDOR-2, MSU-M, MSU-S, RLSBO, RM-0.8	Agriculture and forestry, climatology, data collection and communication, hydrology, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology
Electro-GOMS N1 (RSA)	In service	November 1994 4 years	Geostationary at 76 deg East, 36000km, 24 hour	BRK, BTVK, RMS	Climatology, data collection and communication, disaster warning, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology, space environment. Continuous observation of cloud cover and Earth's surface
Resource-01 N3 (ROSHYDROMET)	In service	November 1994 4 years	Near polar, sun synchronous 98 deg inclination, 670km	MSU-E, MSU-SK (Resource-01 N3)	Agriculture and forestry, hydrology, environmental monitoring, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology

NOAA 14 (NOAA)	In service	December 1994 2 years 9 months	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 851km, 102.1 mins	ARGOS, AVHRR/2, HIRS/2, MSU, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM, SSU	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search and Rescue
GMS-5 (NASDA)	In service	March 1995 5 years	Geostationary	VISSR (GMS5)	Meteorology
ERS-2 (ESA)	In service	April 1995 4 years 2 months	Sun synchronous, 785km, 10.30 LST descending phase, 100.5 mins	AMI - SAR image mode, AMI - SAR wave mode, AMI - Scatterometer mode, ATSR-2, GOME, MWR, PRARE, RA	Earth resources plus physical oceanography, ice and snow, land surface, meteorology, geodesy/gravity, environmental monitoring, atmospheric chemistry
GOES 9 (NOAA)	In service	May 1995 5 years	Geostationary	DCS, IMAGER, S&R (GOES), SEM SOUNDER, WEFAX	Meteorology (primary mission), search and rescue, space environment monitoring, data collection, platform,

					data gathering, WEFAX
SICH-1 (NSAU)	In service	August 1995 2 years 1 month	82.5 deg inclination, 650km, 98 mins	MSU-M, MSU-S	Physical oceanography, hydrometeorology
RADARSAT (CSA)	In service	September 1995 5 years	Dawn-dusk, 98.6 deg inclination, ascending crossing 1800h LST, 793km-821km, 7 & 3 day subcycles, 24 days	SAR	Environmental monitoring, physical oceanography, ice and snow, land surface
IRS 1c (ISRO)	In service	December 1995 3 years	Sun synchronous, 817km, 101.35 mins, 24 days	LISS III, PAN, WiFS	Land surface, agriculture and forestry regional geology, land use studies, water resources, vegetation studies, coastal studies and soils, cartography, digital terrain models
PRIRODA (RSA)	In service	December 1995 4 years	MIR space station, 51.6 deg inclination, 380-420km	ALISSA, DOPI, IKAR-D, IKAR-N, IKAR-P, ISTOK-1, MOMS-2P, MOS (PRIRODA),	Agriculture and forestry, atmospheric chemistry, atmospheric dynamics/water and energy cycles, climatology, digital terrain models,

				MSU-E2, MSU-SK (PRIRODA), Ozon-M, R-400, Travers SAR, TV camera	meteorology, ocean biology/ocean colour, physical oceanography, space environment
FY-2 (China (CMA))	In service	1996 3 years	Geostationary at 105 deg East	Multispectral Visible & IR Scan Radiometer (3 channel)	Meteorology and environmental monitoring Data collection and redistribution
Resource-F1M series (RSA)	In service	1996 4 years	82.3 deg (1,2: near-circular, 3: elliptical), 1:235km 2:285km, 3:180-305km, 89.16 mins, 14 days	KFA-1000 KFA-200	Land surface, physical oceanography, geodesy/gravity
Resource-F2 series (RSA)	In service	1996 3 years	82.3 deg inclination, 240km, 89.22 mins, 16 days	MK-4	Land surface, physical oceanography
Resource-F3 series (RSA)	In service	1996 2 years	82.3 deg inclination, 240, 275, 340km, 89.22 mins, 14 days	KFA-3000	Cartography (land and ocean) 1:25000 and below
IRS P3 (ISRO)	In service	March 1996 3 years	Sun synchronous, 817km, 101.35 mins	MOS, WiFS, X-ray astronomy payload	Ocean biology, physical oceanography, land surface, agriculture and forestry, water resources, vegetation

					and coastal studies
TOMS Earth Probe (NASA)	In service	July 1996 2 years	Sun synchronous, 670-690km, 98 mins	TOMS	Atmospheric chemistry, Ozone and sulphur dioxide measurements
GOES 10 (NOAA)	In service	April 1997 5 years	Geostationary	DCS, IMAGER, S&R (GOES), SEM, SOUNDER, WEFAX	Meteorology (primary mission), search and rescue, space environment monitoring, data collection platform, data gathering, WEFAX
OrbView-2 (NASA)	In service	August 1997 5 years	Polar, sun synchronous, crossing 1200h LST, descending, 705km, 99 mins, 2 days	SeaWiFS	Ocean biology/ocean colour, physical oceanography
MECB SCD-2A (INPE)	Firm/ approved	September 1997 2 years	25 deg inclination, 750km, 100mins	DCP	Data collection and communication
METEOSAT 7 (EUMETSAT)	Firm/ approved	October 1997 5 years	Geostationary	MVIRI	Meteorology, climatology
TRMM (NASA)	Firm/ approved	November 1997 3 years	35 deg inclination, 350km	CERES, LIS, PR, TMI, VIRS	Atmospheric dynamics/water and energy cycles
INSAT IIe (ISRO)	Firm/ approved	1998 7 years	Geostationary	BSS & FSS transponders, CCD camera (INSAT-IIe),	Meteorology, data collection and communication, search and rescue

				DRT-S&R, VHRR	
IRS 1d (ISRO)	Firm/ approved	1998 3 years	Sun synchronous, 817km, 101.35 mins, 24 days	LISS III, PAN, WiFS	Land surface, agriculture and forestry regional geology, land use studies, water resources, vegetation studies, coastal studies and soils
MECB SCD-2 (INPE)	Firm/ approved	1998 2 years	25 deg inclination, 750km, 100mins	DCP	Data collection and communication
METEOR-3M N1 (RSA)	Proposed	1998 3 years	Near polar, sun synchronous, 1000km	KGI-4 C, Klimat, MIVZA, MR-2000M, MR-900M, MSGI-5EI, MTVZA, SAGE III, SFM-2	Agriculture and forestry, climatology, hydrology, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology, space environment
Resource-01 N4 (RSA)	Proposed	1998 2 years	Near polar, sun synchronous, 98 deg inclination, 670km	ISP-2M, MR-900M, MSU-E1, MSU-SK (Resource-01 N4), RMK-2, SFM-2	Land surface, physical oceanography
Resource-F2M series (RSA)	Firm/ approved	1998 2 years	82.3 deg inclination, 240km, 89.22 mins, 14 days	MK-4M	Agriculture and forestry, cartography, civil planning, digital terrain models, earth resources, hydrology,

					ice and snow, land surface, ocean biology/ocean colour, physical oceanography
IRS P4 (aka OCEANSAT-1) (ISRO)	Firm/ approved	February 1998 5 years	Sun synchronous, LST noon ± 20 mins descending, 720km, 98 mins, approx 22 days	MSMR, OCM	Ocean biology, physical oceanography
NOAA K (NOAA)	Firm/ approved	February 1998 3 years	Near polar, sun synchronous, am crossing, 825-850km	AMSU-A, AMSU-B, ARGOS, AVHRR/3, HIRS/3, S&R (NOAA), SEM	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search and Rescue
SPOT 4 (CNES)	Firm/ approved	February 1998 5 years	Sun synchronous, 830km, 101 mins, 26 days	DORIS, HRVIR, VEGETATION	Cartography, land surface, agriculture and forestry, civil planning and mapping, digital terrain models,

					environmental monitoring
CBERS 1 (INPE)	Firm/ approved	May 1998 2 years	Sun synchronous, crossing 1030h LST, 778km, 100 min, 26 days	CCD camera, DCP, IRMSS, WFI camera	Earth resources, environmental monitoring, land surface
EOS-AM 1 (NASA)	Firm/ approved	June 1998 6 years	Polar, sun synchronous, crossing 1030h LST, descending, 705km, 99 mins, 16 days	ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT	Atmospheric dynamics/water and energy cycles, Atmospheric chemistry, Physical and radiative properties of clouds, air-land exchanges of energy, carbon and water, vertical profiles of CO and methane vulcanology
Odin (SNSB)	Firm/ approved	September 1998 2 years	Circular, polar, sun synchronous terminator orbit, 620km, 97 mins, 5 days (±100km at equator)	IR imager, radiometer, UV-visible spectrometer	Astronomy/aeronomy mission Atmospheric chemistry, atmospheric dynamics/water and energy cycles, climatology, astronomy
OKEAN-O (NSAU)	Firm/ approved	September 1998 1 year	Near polar, sun synchronous, 98 deg inclination,	DELTA-2, KONDOR-2, MSU-M, MSU-S, R-225, RLSBO	Agriculture and forestry, hydrology, environmental monitoring, crop and soil monitoring,

			670km, 98 mins		forest and tundra fires, pollution monitoring
LANDSAT 7 (NASA)	Firm/ approved	December 1998 6 years	Polar, sun synchronous, crossing equator 0945-1015h LST, 705km, 98 mins, 233 orbits/cycle, 16 days	ETM+	Land surface, Earth resources
Electro-GOMS N2 (RSA)	Proposed	1999 2 years	Geostationary at 76 deg East, 36000km, 24 hour	BRK, BTVK, RMS	Climatology, data collection and communication, disaster warning, hydrometeorology, ice and snow, land surface, meteorology, space environment. Continuous observation of cloud cover and Earth's surface.
FY-1C (China (CMA))	Firm/ approved	1999 1 year	Polar, sun synchronous, 870km, 102.3 mins, 14 days	Multispectral Visible & IR Scan Radiometer (10 channel)	Meteorology Environmental monitoring
GOES L (NOAA)	Firm/ approved	February 1999 5 years	Geostationary	DCS, IMAGER, S&R (GOES), SEM, SOUNDER, WEFAX	Meteorology (primary mission), search and rescue, space environment monitoring. Data

					collection platform, data gathering, WEFAX
ACRIMSAT (NASA)	Firm/ approved	May 1999 5 years	TBD	ACRIM	Will sustain long term solar luminosity database by providing measurements of total solar irradiance and the solar constant
NMP EO-1 (NASA)	Firm/ approved	May 1999 3 years	Sun synchronous, 98.2 deg inclination, 1045h LST descending phase, 705km	ALI, GIS, MS, WIS	Land surface Earth resources
CHAMP (DARA)	Firm/ approved	June 1999 5 years	Non sun synchronous, 83 day inclination, 450km (beginning of life), 300km (end of life)	Magnetometry package (CHAMP), STAR Accelerometer, TRSR	Gravity field Precise geoid Magnetic field Atmospheric physics
ENVISAT 1 (ESA)	Firm/ approved	Spring 2000 5 years	Polar, 780-820km, 100.59 mins, 35 days	AATSR, ASAR, DORIS-NG, GOMOS, MERIS, MIPAS, MWR, RA-2, SCIAMACHY	Physical oceanography, land surface, ice and snow, atmospheric chemistry, atmospheric

					dynamics/water and energy cycles
IRS P5 (aka CARTOSAT-1) (ISRO)	Proposed	June 1999 5 years	Sun synchronous, 617km, approx 101 mins, 22 days	HR PAN, LISS IV	Cartography, digital terrain models, civil planning, resource and cadastre management
ADEOS II (NASDA)	Firm/ approved	August 1999 3 years	Circular, sun synchronous 1030h ±15mins LST, approx 802.9km, approx 101 mins, 4 days (57 revisit)	AMSR, DCS (NASDA/CNES), GLI, ILAS-II, POLDER, Sea Winds	Atmospheric dynamics/water and energy cycles Land surface Physical oceanography
MTSAT (Ministry of Aeronautical Transportation Control, Japan)	Firm/ approved	August 1999 5 years	Geostationary	IMAGER (MTSAT)	Meteorology Aeronautical applications
SICH-1M (NSAU)	Firm/ approved	September 1999 1 year	82.5 deg inclination, 650km, 98 mins	MSU-EU, MSU-M, RLSBO, RM-0.8	Physical oceanography, hydrometeorology
NOAA L (NOAA)	Firm/ approved	December 1999 3 years	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 825-850km	AMSU-A, AMSU-B, ARGOS, AVHRR/3, HIRS/3, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption

					monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search and Rescue
ARIES-1 (Australia)	Proposed	2000 5 years	Circular, sun synchronous, 500km	Imaging spectrometer, Panchromatic sensor	Earth resources, agriculture and forestry, water resources, vegetation studies
CBERS 2 (INPE)	Firm/ approved	2000 2 years	Sun synchronous, crossing 1030h LST, 778km, 100 mins, 26 days	CCD camera, DCP, IRMSS, WFI camera	Earth resources, environmental monitoring, land surface
ESSP-1A (aka VCL) (NASA)	Firm/ approved	2000 2 years	55 deg inclination, 390-410km	VCL	Land use, land cover, vegetation and topographic mapping
MDS-2 (NASDA)	Proposed	2000 1 year	Equatorial, 30 deg inclination, 550km, 16 mins	LIDAR	Climatological data on clouds and aerosols
METEOR-3M N2 (RSA)	Proposed	2000 3 years	Near polar, sun synchronous, 98 deg inclination,	KGI-4, MIVZA, MSGI-5, MSR (RSA), MTVZA, MZOAS, SAGE III, ScaRaB,	Land surface, physical oceanography, atmospheric dynamics/water

			900km	SFM-2, TOMS	and energy cycles, space environment
NIKA-Kuban (RSA)	Proposed	2000 2 years	81.4 deg, 248-273km	Camea, Gemma	Land surface, physical oceanography
GOES M (NOAA)	Firm/ approved	February 2000 5 years	Geostationary	DCS, IMAGER, S&R (GOES), SEM, SOUNDER, SXI, WEFAX	Meteorology (primary mission), search and rescue, space environment monitoring, data collection platform, data gathering, WEFAX
Jason-1 (NASA)	Firm/ approved	April 2000 3 years	66 deg inclination, 1336km, 113 mins, 14 days	DORIS-NG, GPSDR, JMR (formerly AMR), LRA, POSEIDON-2 (aka SSALT-2)	Physical oceanography, geodesy/gravity, climate monitoring, marine meteorology
IRS P6 (aka RESOURCE SAT-1) (ISRO)	Proposed	June 2000 3 years	Sun synchronous, 817km, approx 1001 mins, approx 22 days	AWiFs, LISS III (IRS-P6), LISS IV	Agriculture and forestry, disaster warning, Earth resources, environmental monitoring, land surface, ocean biology/ocean colour
MSG 1 (EUMETSAT)	Firm/ approved	June 2000 7 years	Geostationary	GERB, SEVIRI	Meteorology, Climatology, Atmospheric

					dynamics/water and energy cycles
EOS-PM 1 (NASA)	Firm/ approved	December 2000 5 years	Polar, sun synchronous, crossing 1330h LST, ascending, 705km, 99 mins	AIRS, AMSR-E, AMSU, HSB, MODIS	Atmospheric dynamics/water and energy cycles, cloud formation, precipitation and radiative properties, air/sea fluxes of energy and moisture, sea ice extent and heat exchange with the atmosphere
FY-1D (China (CMA))	Firm/ approved	2001 1 year	Polar, sun synchronous, 870km, 102.3 mins, 14 days	Multispectral Visible & IR Scan Radiometer (10 channel)	Meteorology Environmental monitoring
Light SAR (NASA)	Proposed	2001 5 years	TBD	TBD	TBD
MECB SSR-1 (INPE)	Firm/ approved	2001 4 years	Equatorial, 0 deg inclination, 905km, 103 mins, 0.2 day	OBA	Earth resources, environmental monitoring, land surface
METOP 1 (EUMETSAT)	Proposed	2001 5 years	Polar, sun synchronous, at 0930h LST in descending phase, approx 840km, 101.7 mins	ASCAT, GOME-2, GRAS, IASI, MHS	Meteorology Climatology

RADARSAT-2 (CSA)	Proposed	2001 5 years	Dawn-dusk, 98.6 deg inclination, ascending crossing 1800h LST, 793km-821km, 7 & 3 day subcycles, 24 days	SAR	Environmental monitoring, physical oceanography, ice and snow, land surface
ESSP-1B (aka GRACE) (NASA)	Firm/ approved	March 2001 5 years	83 degree inclination, initial altitude 450km	GRACE	Detection of Earth gravity field variation
NOAA M (NOAA)	Firm/ approved	April 2001 3 years	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 825-850km	AMSU-A, AMSU-B, ARGOS, AVHRR/3, HIRS/3, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, space environment, solar flux analysis, life-saving capability through Search and Rescue
FedSat-1	Firm/	June 2001	Circular	GPS receiver,	Communications,

(Australia)	approved	5 years	orbit, inclination TBD, 1000km	Magnetometer and advanced communications payload	data relay, near Earth environment, upper atmospheric physics, meteorology
EOS-LAM 1 (NASA)	Proposed	July 2001 3 years	94 deg inclination, 600km, 90 mins	GLAS	Physical oceanography, geodesy/gravity, land surface, ocean altimetry and circulation, ice sheet mass balance, geological features
MECB SCD-3 (INPE)	Firm/ approved	2002 2 years	0 deg inclination, 750km, 100mins	DCP, LEO communication transponder	Data collection and communication
SPOT 5 (CNES)	Firm/ approved	2002 5 years	Sun synchronous, 830km, 101 mins, 26 days	DORIS-NG, HRG, VEGETATION	Cartography, land surface, agriculture and forestry, civil planning and mapping, digital terrain models, environmental monitoring
EOS-CHEM 1 (NASA)	Firm/ approved	December 2002 6 years	Polar, sun synchronous, 705km, 99 mins	HiRDLS, MLS (EOS-CHEM), Ozone instrument - TBD, TES	Atmospheric chemistry Atmospheric dynamics/water and energy cycles

MSG 2 (EUMETSAT)	Firm/ approved	December 2002 7 years	Geostationary at 0 deg of longitude	GERB, SEVIRI	Meteorology, Climatology, Atmospheric dynamics/water and energy cycles
CARTOSAT-2 (ISRO)	Proposed	2003 5 years	Sun synchronous, 617km, approx 101 mins, approx 22 days	TBD	Cartography, digital terrain models, civil planning, resource and cadastre management
MECB SSR-2 (INPE)	Firm/ approved	2003 4 years	Equatorial, 0 deg inclination, 905km, 103 mins, 0.2 days	OBA	Earth resources, environmental monitoring, land surface
MTSAT-2 (Ministry of Aeronautical TransportationControl, Japan)	Proposed	2003 5 years	Geostationary	IMAGER (MTSAT)	Meteorology, Aeronautical applications
OCEANSAT-2 (ISRO)	Proposed	2003 5 years	Sun synchronous, 720km, approx 101 mins, approx 22 days	TBD	Ocean biology, physical oceanography
ALOS (NASDA)	Proposed	January 2003 3 years	Sun synchronous, 691km, 46 days	AVNIR-2, PALSAR, PRISM (NASDA)	Cartography, digital terrain models, environmental monitoring, disaster monitoring, civil

					planning, agriculture and forestry, Earth resources, land surface
RESOURCE SAT-2 (ISRO)	Proposed	June 2003 5 years	Sun synchronous, 817km, approx 101 mins, approx 22 days	TBD	Agriculture and forestry, disaster warning, Earth resources, environmental monitoring, land surface, ocean biology/ocean colour
NOAA N (NOAA)	Firm/ approved	December 2003 3 years	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 825-850km	AMSU-A, ARGOS, AVHRR/3, HIRS/4, MHS, MHS, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, total ozone studies, ice and snow cover, solar flux analysis, space environment, life-saving capability through Search and Rescue
EOS-AM Follow-on missions (NASA)	Proposed	2004 6 years	TBD	TBD	TBD

ESA Future Missions (ESA)	Proposed	2004 10 years	Polar and possibly other LEOs	ALADIN, ATLID, Cloud radar, COALA, Gradiometer, GRAS, Laser altimeter, MASTER, MHS, MIPAS, MWR, PRISM, Radar altimeter, Rain radar, SAR (ESA Future Missions), SOPRANO, VIS/IR imager	Physical oceanography, land surface, ice and snow, atmospheric dynamics/water and energy cycles
Jason Follow-on (CNES)	Proposed	2004 3 years	66 deg inclination, 1336km, 113 mins, 10 days	DORIS-NG, GPSDR, JMR (formerly AMR), LRA, POSEIDON-2 (aka SSALT-2	Physical oceanography, geodesy/gravity, climate monitoring, marine meteorology
ATMOS-1 (ISRO)	Proposed	2005 5 years	TDB	TBD	Climatology, atmospheric research
CLIMATSAT-1 (ISRO)	Proposed	2005 5 years	TDB	TBD	Meteorology and climatology
IRS-3 (ISRO)	Proposed	2005 5 years	TDB	TBD	SAR instrument for land and marine applications
EOS-LAM Follow-on missions (NASA)	Proposed	2006 3 years	TBD	TBD	TBD
EOS-PM Follow-on missions	Proposed	2006 5 years	TBD	TBD	TBD

(NASA)					
METOP 2 (EUMETSAT)	Proposed	December 2006 5 years	Polar, sun synchronous, TBD	ASCAT, GOME-2, GRAS, IASI, MHS	Meteorology, Climatology
EOS-CHEM Follow-on missions (NASA)	Proposed	2007 5 years	TBD	TBD	TBD
MSG 3 (EUMETSAT)	Firm/ approved	June 2007 7 years	Geostationary	GERB, SEVIRI	Meteorology, Climatology, Atmospheric dynamics/water and energy cycles
NOAA N' (NOAA)	Firm/ approved	July 2007 3 years	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 825-850km	AMSU-A, ARGOS, AVHRR/3, HIRS/4, MHS, S&R (NOAA), SBUV/2, SEM	Meteorology, agriculture and forestry, environmental monitoring, climatology, physical oceanography, Volcanic eruption monitoring, ice and snow cover, total ozone studies, solar flux analysis, space, environment, life-saving capability through Search and Rescue
First Converged Spacecraft (NPOESS) (NOAA)	Firm/ approved	2009 5 years	Near polar, sun synchronous, pm crossing, 825-850km	ARGOS, S&R (NOAA)	Meteorology, climatology and other environmental applications

METOP 3 (EUMETSAT)	Proposed	December 2010 5 years	Polar, sun synchronous, descending phase, approx 840km, 101.7 mins	ASCAT, GRAS, IASI, MHS	Meteorology, climatology

Misiones Espaciales

ACRIMSAT (NASA)
ADEOS II (NASDA)
ALOS (NASDA)
ARIES-1(Australia)
ATMOS-1 (ISRO)
CARTOSAT-2 (ISRO)
CBERS 1 (INPE)
CBERS 2 (INPE)
CHAMP(DARA)
CLIMATSAT-1 (ISRO)
Electro-GOMS N1 (RSA)
Electro-GOMS N2 (RSA)
ENVISAT 1(ESA)
EOS-AM 1 (NASA)
EOS-CHEM 1 (NASA)
EOS-LAM 1 (NASA)
EOS-PM 1 (NASA)
ERS-1 (ESA)
ERS-2 (ESA)
ESSP-1A (aka VCL) (NASA)
ESSP-1B (aka GRACE) (NASA)
FedSat-1(Australia)
First Converged Spacecraft (NPOESS) (NOAA)
FY-1C (China (CMA))
FY-1D (China (CMA))
FY-2 (China (CMA))

GMS-4(NASDA)

GMS-5 (NASDA)

GOES 10 (NOAA)

GOES 7 (NOAA)

GOES 8 (NOAA)

GOES 9 (NOAA)

GOES L(NOAA)

GOES M (NOAA)

INSAT IIa(ISRO)

INSAT Iib (ISRO)

INSAT IIe (ISRO)

IRS 1a (ISRO)

IRS 1b (ISRO)

IRS 1c (ISRO)

IRS 1d (ISRO)

IRS P2(ISRO)

IRS P3 (ISRO)

IRS P4 (aka OCEANSAT-1) (ISRO)

IRS P5 (aka CARTOSAT-1) (ISRO)

IRS P6 (aka RESOURCE SAT-1) (ISRO)

IRS-3 (ISRO)

Jason-1 (NASA)

JERS 1(NASDA)

LAGEOS (NASA)

LAGEOS II (NASA)

LANDSAT 5 (NOAA)

LANDSAT 7 (NASA)

Light SAR(NASA)

MDS-2 (NASDA)

MECB SCD-1 (INPE)

MECB SCD-2 (INPE)

MECB SCD-2A (INPE)

MECB SCD-3 (INPE)

MECB SSR-1 (INPE)

MECB SSR-2 (INPE)

METEOR-2 N24 (ROSHYDROMET)

METEOR-3 N5 (ROSHYDROMET)

METEOR-3M N1 (RSA)

METEOR-3M N2 (RSA)

METEOSAT 6(EUMETSAT)

METEOSAT 7 (EUMETSAT)

METOP 1 (EUMETSAT)

METOP 2 (EUMETSAT)

METOP 3 (EUMETSAT)

MSG 1 (EUMETSAT)

MSG 2(EUMETSAT)

MSG 3 (EUMETSAT)

MTSAT(Ministry of Aeronautical Transportation Control, Japan)

MTSAT-2 (Ministry of Aeronautical TransportationControl, Japan)

NIKA-Kuban (RSA)

NMP EO-1 (NASA)

NOAA 11 (NOAA)

NOAA 12 (NOAA)

NOAA 14 (NOAA)

NOAA 9 (NOAA)

NOAA K (NOAA)

NOAA L(NOAA)

NOAA M (NOAA)

NOAA N (NOAA)

NOAA N' (NOAA)

Ocean-01 N7 (ROSHYDROMET)

OCEANSAT-2(ISRO)

Odin (SNSB)

OKEAN-O(NSAU)

OrbView-2 (NASA)

PRIRODA (RSA)

RADARSAT (CSA)

RADARSAT-2(CSA)

RESOURCE SAT-2 (ISRO)

Resource-01 N3 (ROSHYDROMET)

Resource-01 N4(RSA)

Resource-F1M series(RSA)

Resource-F2 series(RSA)

Resource-F2M series(RSA)

Resource-F3 series (RSA)

SICH-1 (NSAU)

SICH-1M(NSAU)

SPOT 1 (CNES)

SPOT 2 (CNES)

SPOT 4(CNES)

SPOT 5 (CNES)

STELLA(CNES)

TOMS Earth Probe (NASA)

TOPEX/ POSEIDON(NASA)

TRMM (NASA)

UARS(NASA)

Bibliografía

[1] CHUVIECO, E.: Fundamentos de Teledetección Espacial. Ed.: Rialp.

[2] CURRAN,P.J.: Principales of Remote Sensing. Ed.: Longman.

[3] LILLESAND,T.M-KIEFER: Remote Sensing and Image. Interpretation. Ed.: J. Wiley

[4] LINTZ-SIMONET.: Remote Sensing of Environment. Ed.: Addison Wesley (ABP).

[5] MATHER, P.M.: Computers Processing of Remotely Sensed Images. Ed.: J. Wiley

Tema 42. Fundamentos físicos de la Teledetección. Radiación electromagnética, emisión e interacción con la materia. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera. Interacción con la superficie terrestre. Medida de temperaturas mediante imágenes en el infrarrojo térmico: técnicas y aplicaciones

Introducción

La observación remota es la adquisición de información procedente de un objeto lejano sin mediar contacto físico a partir de la medida de energía electromagnética. La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección, que engloba, no solo los procesos de obtención de la imagen sino también su posterior tratamiento para una determinada aplicación.

La teledetección se basa en el estudio de las diferentes respuestas de las superficies a la radiación electromagnética, caracterizándose cada una de ellas por la denominada *signatura espectral*.

En un sistema de teledetección se consideran los siguientes elementos:

- Emisor: fuente de radiación electromagnética
- Receptor: de ondas electromagnéticas en instrumentos a bordo de plataformas
- Flujo energético: es el canal de comunicación entre emisor y receptor y en él se consideran los procesos de:
  - interacción de la radiación emitida con la atmósfera
  - interacción de la radiación con la superficie terrestre

El flujo energético puede ser generado por emisión de la propia superficie, por reflexión de un flujo de energía sobre la superficie o mixto, por emisión-reflexión en caso de trabajar con flujos de energía emitidos y posteriormente recogiendo la señal reflejada. En cualquiera de ellos, el flujo energético transmitido entre la superficie terrestre y el receptor son formas de radiación electromagnética.

42.1. Radiación electromagnética, emisión e interacción con la materia

El estudio de la radiación electromagnética se explica por dos teorías; la que concibe la radiación como un haz ondulatorio (Huygens y Maxwell) y otra que la considera de naturaleza

corpuscular, como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa cero (Planck, Einstein).

Se dice que un campo eléctrico que varía en el tiempo producirá una corriente de desplazamiento que, según la ley de Ampère-Maxwell, será fuente de un campo magnético. A su vez éste último, al ser variante, producirá un campo eléctrico, de acuerdo a la ley de Faraday. De este modo ambos campos se sostienen uno al otro. Este proceso de propagación fue teorizado por J.C. Maxwell y posteriormente, Heinrich R. Hertz detectó experimentalmente las ondas electromagnéticas.

Maxwell mostró las relaciones entre la luz y el electromagnetismo a través de las denominadas leyes de Maxwell, en las que se definen las interacciones electromagnéticas.

Definido el campo electromagnético por dos vectores: el campo eléctrico $\vec{E}$ y el campo magnético $\vec{B}$, se formulan las ecuaciones de Maxwell:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico

$$(1) \quad div\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho$$

siendo ρ la densidad de carga eléctrica y ε_0 la constante dieléctrica del medio.

- Ley de Gauss para el campo magnético

$$(2) \quad div\vec{B} = 0$$

- Ley de la inducción de Faraday-Henry

$$(3) \quad rot\vec{E} = -\frac{\delta B}{\delta t}$$

siendo *t* el tiempo.

- Ley de Ampère-Maxwell

$$(4) \quad rot\vec{B} = \mu_0\vec{J}_d + \mu_0\vec{J}$$

donde $\vec{J}_d = \varepsilon_0 \frac{\delta E}{\delta t}$ es la corriente de desplazamiento o velocidad de variación del campo eléctrico y el término $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ es la densidad de corriente o variación de la carga con el tiempo, donde σ es la conductividad eléctrica.

Las ecuaciones de Maxwell se simplifican en el vacío teniendo $\rho = 0$ y $\vec{J} = 0$, de forma que:

$$(5)\quad \begin{aligned} div\vec{E} = 0; rot\vec{E} = -\frac{\delta B}{\delta t} \\ divB = 0; rot\vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\delta \vec{E}}{\delta t} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la teoría del movimiento ondulatorio, una onda se describe como una perturbación que se propaga en el espacio transportando energía. Si suponemos un campo electromagnético que satisface las ecuaciones de Maxwell en el vacío, debe existir un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí, donde sus intensidades dependen del espacio recorrido *y* (que corresponde a la fase de la onda), y del tiempo *t* de la siguiente forma:

$$(6)\quad \begin{aligned} \vec{E} = E_0 sen(y - vt)\vec{k} \\ \vec{B} = B_0 sen(y - vt)\vec{i} \end{aligned}$$

siendo *v* la velocidad de propagación del campo que es constante e igual a *c* (velocidad de la luz). También son constantes los valores E_0 y B_0 que corresponden a las amplitudes de las ondas del campo eléctrico y magnético respectivamente. El valor *v* es una frecuencia expresada en metros por segundo que podemos expresar en función de la frecuencia *f* en ciclos por segundo, es decir en Hertzios, entonces $v=2\pi f$. De esta expresión y las ecuaciones (6) se deduce que a un intervalo de distancia constante los valores de las intensidades del campo se repiten, este intervalo es denominado longitud de onda y viene representado por λ, siendo $\lambda=v/f$.

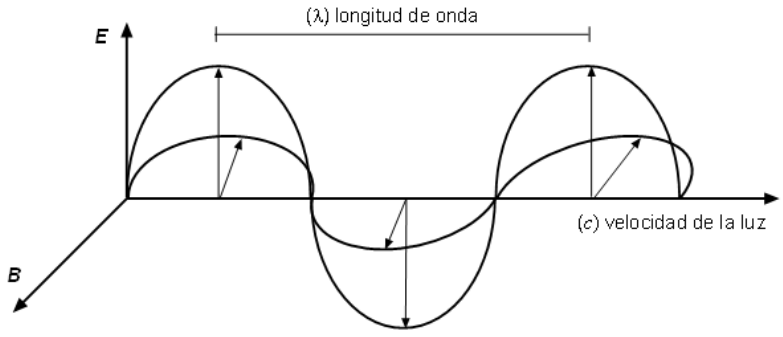


Figura 1. Propagación del campo electromagnético

De la aplicación de las relaciones de Maxwell y del estudio de la propagación del campo electromagnético se dice que cualquier onda electromagnética plana en el vacío cumple lo siguiente:

- El campo se propaga a la velocidad *c* de la luz (c=3 10^8 m/s)

- En cada punto de la onda y cada tiempo, la intensidad del campo eléctrico es igual a *c* por la del magnético, es decir, ambos campos están en fase y por lo tanto toman valores máximos, mínimos y nulos simultáneamente
- El campo eléctrico y el magnético son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación

Por otro lado, Max Planck considera que todo cuerpo radiante emite energía electromagnética de forma discreta, no continua, cuya magnitud es múltiplo entero de un número denominado *cuanto*. De esta forma, se dice que:

$$\Delta E = hf \quad (7)$$

donde *h* es la constante de Planck (6,626 10^{-34} J s) y f la frecuencia expresada en Hz, siendo:

$$f = c/\lambda \quad (8)$$

A partir de la teoría cuántica podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón conocida su frecuencia. Esto, significa que a mayor longitud, o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa.

En definitiva, la naturaleza de la radiación electromagnética se explica considerando ambas teorías y de donde se deduce que es posible definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o de su frecuencia.

En este sentido, se van a estudiar los diferentes tipos de radiaciones electromagnéticas clasificándolas según su longitud de onda o frecuencia. El espectro electromagnético (ver figura 2) es la sucesión de las distintas radiaciones electromagnéticas donde se realiza una clasificación ordenando las longitudes de onda de menor a mayor distinguiendo varios grupos con características comunes: en este orden tenemos la región de los rayos gamma, los rayos X, el ultravioleta, el espectro visible, el infrarrojo próximo, el infrarrojo térmico y las regiones de microondas, radar y radio y televisión.

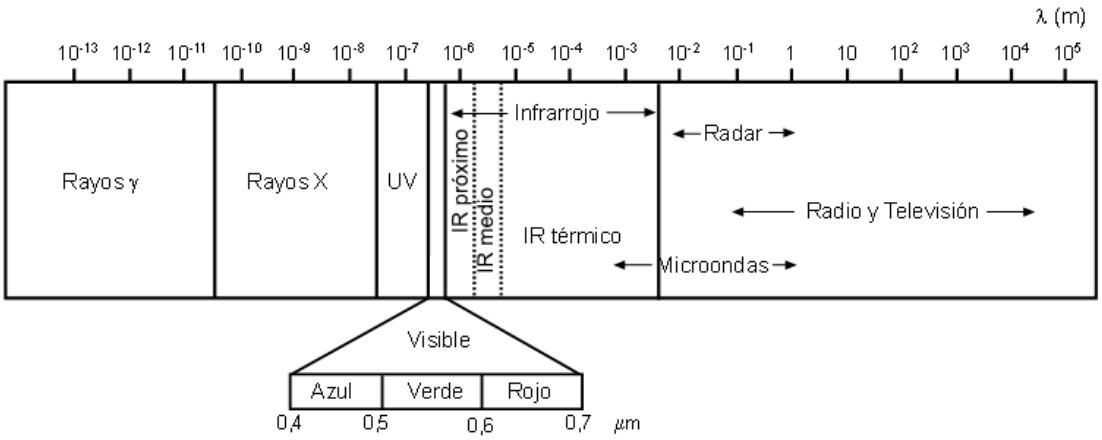


Figura 2. Espectro electromagnético.

En teledetección, las regiones del espectro más utilizadas son:

- visible (0,4 a 0,7 μm)
- infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm)
- infrarrojo medio (1,3 a 3 μm)
- infrarrojo lejano o térmico (7 a 15 μm)
- microondas (1mm a 10 cm)

Recordemos ahora que el objeto de la teledetección es la caracterización de las respuestas que ofrece la superficie terrestre a las distintas fuentes de radiación electromagnética. Para este estudio es conveniente tener presente algunas definiciones:

- *Energía radiante* (*Q*): es el total de energía transportada por las ondas electromagnéticas en todas las direcciones, mide el trabajo que puede realizar la onda (se mide en Julios)
- *Densidad de energía radiante* (*W*): es la cantidad de energía por unidad de volumen $W = {dQ}/{dV}$ medida en J/m^3.
- *Flujo radiante* (Φ): es la energía radiada por unidad de tiempo $\Phi = {dQ}/{dt}$. Se mide en watios (W).
- *Densidad de flujo radiante:* es el flujo radiante por unidad de superficie plana, se mide en W/m^2. Dentro de la densidad de flujo tenemos la *Irradiancia radiante* (*E*) que indica el flujo radiante que incide en la superficie y la *Exitancia o Emitancia radiante* (*M*) que indica el flujo emitido desde la superficie. Por lo tanto tenemos: $E, M = {d\Phi}/{dS}$.
- *Intensidad radiante* (*I*): es el flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido $I = {d\Phi}/{d\Omega}$. Se mide en Watios/estereorradián (W/sr).
- *Radiancia* (*L*): es la intensidad radiante *I* emitida en una determinada dirección, en notación matemática: $L = {dI}/{dA}\cos\theta$. Se mide en W sr^{-1} m^{-2}. El ángulo θ es la dirección que forma la normal a superficie emisora de radiación con una dirección considerada. Cuando la radiancia se refiere a una longitud de onda en particular se denomina radiancia espectral. Esto se aplica de la misma forma para la irradiancia y la emitancia.

En este contexto, podemos escribir que la radiación de ondas electromagnéticas se produce por la generación de energía radiante. Esta energía radiante se produce por la transformación de otros tipos de energía, por ejemplo, la energía térmica se produce por la energía cinética de las partículas que al chocar unas con otras producen energía radiante en la región del infrarrojo.

Para el estudio de la caracterización espectral de las distintas fuentes de radiación se utiliza el denominado *cuerpo negro* que actúa como emisor y reflector perfecto de energía, que se caracteriza porque sólo muestra un máximo para cada longitud de onda en función de la temperatura. De forma que se realiza una simulación para ver la radiación del cuerpo negro a diferentes temperaturas observando de este modo la relación entre el flujo de energía emitido por una superficie y el máximo de longitud de onda de respuesta (Figura 3).

A partir de la relación entre la intensidad de radiación y la temperatura del cuerpo negro se deduce que cualquier objeto por estar a temperatura superior al cero absoluto emite radiación:

$$E = \sigma T^4 \quad (9)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (5,67 10^{-8} W K^{-4}) y T es la temperatura en grados Kelvin. Es interesante saber que a temperaturas inferiores a 700 K se emite radiación en el infrarrojo y si las temperaturas superan los 800 K se emite radiación en el visible.

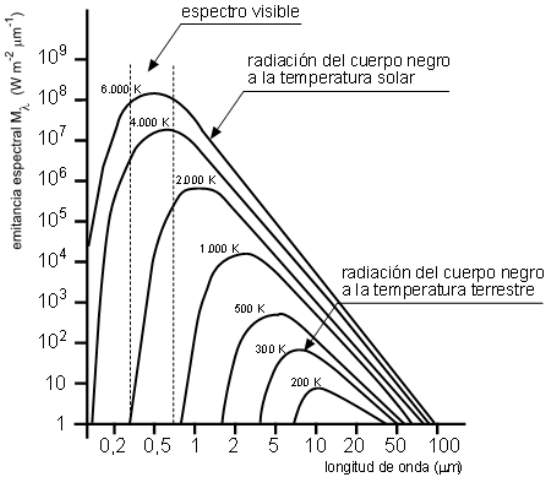


Figura 3. Emitancia espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.

El máximo de longitud de onda para el se verifica un máximo de radiación viene definido por la ley de desplazamiento de Wien.

De todo esto extraemos la idea de que conocer la temperatura de la superficie emisora nos permite seleccionar aquellas longitudes de onda que necesitamos recoger con nuestro sensor para una aplicación determinada. Por ejemplo, para recoger la temperatura que emite la superficie de la Tierra en una determinada región necesitaríamos un sensor capaz de recoger la energía del infrarrojo térmico con longitudes de onda comprendidas entre los 7 y 15 μm.

Con los objetos reales, la respuesta que obtenemos de la simulación de la radiancia máxima del cuerpo negro a diferentes temperaturas es distinta, es decir, existen diferencias entre la energía que emite el cuerpo real respecto del cuerpo negro. La relación entre la capacidad radiante de un cuerpo real y la del cuerpo negro se llama emisividad espectral $\varepsilon(\lambda)$ que se puede expresar como:

$$(10)\quad \varepsilon(\lambda) = \frac{M(\lambda)}{M_n(\lambda)}$$

donde $M(\lambda)$ y $M_n(\lambda)$ son las emitancias espectrales (para una longitud de onda determinada) del cuerpo real considerado y del cuerpo negro, respectivamente.

La *signatura* o *firma espectral* es la cualidad por la que podemos distinguir un objeto de otro, cuando la emisividad espectral $\varepsilon(\lambda)$ de un objeto varía en función de la frecuencia de emisión, entonces el cuerpo considerado se convierte en un radiador selectivo en función de la longitud de onda. En el extremo está la emisividad espectral de un cuerpo negro que es máxima para todas las longitudes de onda.

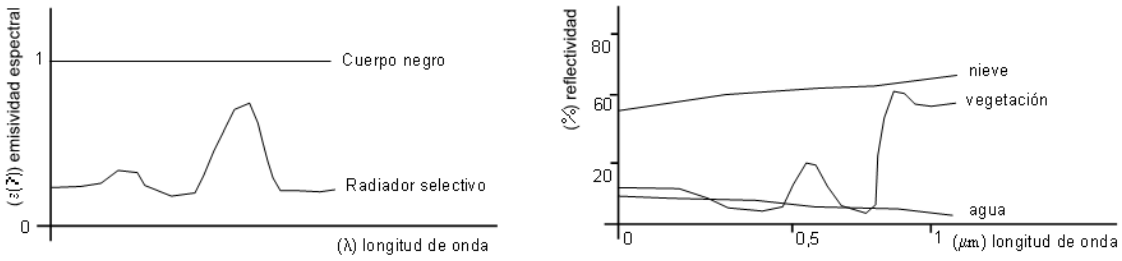


Figura 4. (a) Emisividad de cuerpo negro y de un radiador selectivo. (b) Signaturas espectrales

La signatura es una forma gráfica en donde quedan representadas las diferentes respuestas espectrales de la superficie considerada. Esta representación gráfica, además de identificar, ayuda a elegir las mejores bandas del espectro para la observación del fenómeno a estudiar, seleccionando las longitudes de onda que se corresponden con los máximos esperados de radiancia.

Una vez que conocemos la fuente de la energía radiante y cómo podemos estudiarla, hay que considerar la interacción entre la propia radiación electromagnética y la interacción con la materia. Para esto hay que considerar dos escalas de interacción:

1. Interacción macroscópica: (Figura 5) donde consideramos un flujo incidente Φ_i sobre una superficie, la cual genera a su vez un flujo reflejado Φ_r, uno absorbido Φ_a y uno transmitido Φ_t:

$$(11)\quad \Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

que expresado en función del flujo incidente Φ_i:

$$(12)\qquad \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = 1 \rightarrow \rho + \alpha + \tau = 1$$

donde ρ es la reflectancia, α es la absorbancia y τ es la transmitancia (también denominados reflectividad, absortividad y transmisividad). La suma de ellos es igual a 1 y lo que varía son las proporciones de cada flujo. Por ejemplo, sobre la superficie continental la transmitancia

es muy pequeña y la reflectancia alta y por el contrario, sobre la superficie oceánica la reflectancia será prácticamente nula y la transmitancia muy alta, lo que se traduce en una imagen prácticamente negra en el dominio del espectro visible.

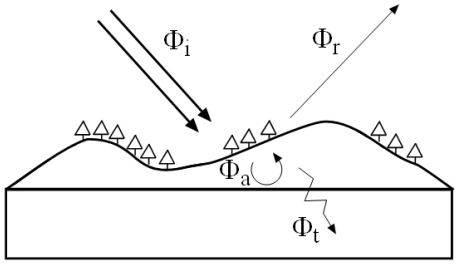


Figura 5. Relaciones en el flujo incidente sobre una superficie

Los receptores encargados de recoger la radiancia de un objeto recogen principalmente la energía reflejada por él y en este proceso hay que tener en cuenta algunos factores externos que modifican ese flujo de energía, como son las condiciones atmosféricas, la topografía de la superficie observada y la geometría de la propia superficie. Los dos primeros aspectos se tratan en los siguientes puntos de interacción con la atmósfera e interacción con la materia, respectivamente.

En cuanto a la geometría de la superficie tenemos que considerar los dos extremos ideales de reflexión de energía (Figura 6): la reflexión especular en donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir, estamos con una superficie perfecta, no rugosa, y en el otro extremo está la reflexión lambertiana, donde la radiancia es independiente de la dirección de emisión, es decir, la energía reflejada es la misma en todas las direcciones.

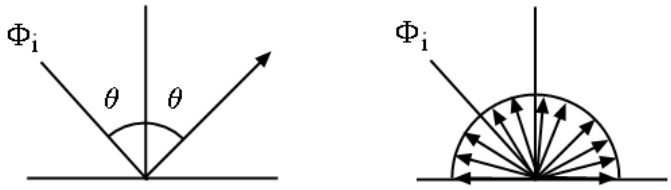


Figura 6. (a) Reflexión especular. (b) Reflexión lambertiana.

En general, las superficies no se comportan de estas dos maneras sino que lo hacen en algún modo intermedio en función de la composición de la superficie y del ángulo de incidencia con la superficie.

2. Interacción a nivel molecular: generalmente, en el ámbito de la teledetección las interacciones a nivel atómico o molecular no se observan, si bien éstas pueden desencadenar procesos que afectan macroscópicamente. La energía que incide en un cuerpo hace que sus

partículas se exciten y pasen a niveles energéticos superiores y cuando estas partículas vuelven a su estado original generan energía en forma de radiación electromagnética, como por ejemplo, el caso de las auroras boreales generadas por el flujo solar que interacciona con las partículas de la atmósfera desprendiendo radiación electromagnética en el intervalo del espectro visible. También, en el proceso descrito de la excitación electromagnética, las partículas pueden desprender calor al chocar unas contra otras y por lo tanto ser observado desde la zona del espectro del infrarrojo térmico.

42.2. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera

La atmósfera juega un papel importante en las técnicas de teledetección ya que es el medio que hay entre el sensor y la superficie terrestre a observar. Los principales procesos que se dan en la interacción con la atmósfera son el de absorción (hace que disminuya la cantidad de energía radiante) y el de dispersión (hace que disminuya el contraste).
Además de estos procesos también existe otro efecto de la interacción de la radiación que se da a escala molecular que es la emisión, proceso derivado del propio calor que desprende.

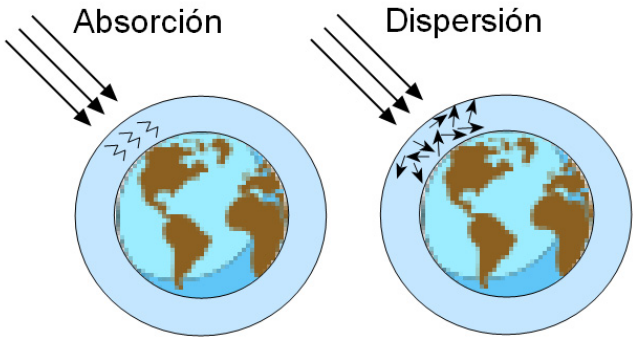


Figura 7. Principales procesos de la interacción atmosférica

La atmósfera se compone de gases, como son el nitrógeno, el oxígeno, el argón, anhídrido carbónico, trazas de otros gases nobles y ozono, y de vapor de agua y aerosoles. Se sabe que la atmósfera tiene una densidad que varía con la altura y que el 97% de su masa está entre la superficie terrestre y unos 26 km de altura.

42.2.1. Absorción atmosférica

La atmósfera al ser atravesada por un flujo de energía electromagnética, absorbe parte de esa energía en diversas regiones del espectro en función de su composición química. Se trata de una absorción selectiva, es decir, solo ocurre en ciertas regiones del espectro que son sensibles a la interacción con los materiales que hay en la atmósfera. La energía obtenida una vez atravesada

la atmósfera presentará unos mínimos que coincidirán con esas regiones de absorción. Estas regiones se denominan *bandas de absorción*.

En algunos casos se pueden presentar bandas de absorción total, en donde sería imposible la observación de la superficie terrestre, como ocurre cuando nos encontramos con altas concentraciones de vapor de agua en la atmósfera llegando a absorber totalmente la energía para determinadas longitudes de onda.

Los principales materiales de absorción presentes en la atmósfera son el vapor de agua, el anhídrido carbónico, el oxígeno atómico y el ozono.

De la misma manera que la atmósfera presenta estas bandas de absorción, en las zonas donde es escasa la absorción hay transmisión atmosférica, estas regiones del espectro se denominan *ventanas atmosféricas* y son las utilizadas para los trabajos de teledetección. Por ejemplo, la zona del visible es prácticamente transparente a la radiación mientras que en el infrarrojo hay varias ventanas espectrales intercaladas con otras zonas de absorción principalmente debido al contenido en anhídrido carbónico y en vapor de agua.

Un ejemplo de absorción atmosférica es el denominado efecto invernadero en donde la radiación solar reflejada por la superficie de la Tierra (con longitud de onda en el infrarrojo térmico) es absorbida y, por lo tanto, retenida por el anhídrido carbónico que hay en la atmósfera para mantener el calor en el globo terrestre.

Los sensores utilizados en teledetección para la observación terrestre se construyen utilizando estas ventanas atmosféricas por esta razón es importante conocerlas. Algunas de ellas son: la región del visible e infrarrojo próximo (0,3 a 1,35 μm), varias regiones en el infrarrojo medio (1,5 a 1,8 μm; 2 a 2,5 μm; 2,9 a 4,1 μm; 4,2 a 5,4) y una región en el térmico de 8 a 15 μm.

Por el contrario, si se quiere estudiar la atmósfera, son las bandas de mayor absorción las que son más interesantes para los sensores de teledetección. Son algunas bandas intercaladas con otras de escasa absorción en el infrarrojo (por ejemplo entre 5,7 y 7 μm) y una región muy amplia del espectro que se extiende por el infrarrojo lejano y las microondas desde los 15 μm hasta 1 mm volviendo a ser transparente la atmósfera para las ondas radar y las de radio y televisión.

42.2.2. Dispersión

La dispersión es el efecto producido por la interacción de los rayos de luz con los aerosoles contenidos en la atmósfera produciendo una pérdida de contraste en las imágenes obtenidas de la superficie terrestre. Es un efecto difícil de cuantificar y por lo tanto de corregir ya que el contenido en partículas de la atmósfera es muy variable.

Existen dos tipos de dispersión, una selectiva y otra no selectiva. La dispersión selectiva es aquella que afecta a determinadas longitudes de onda en función del tamaño de partículas

contenidas en la atmósfera. Dentro de la dispersión selectiva tenemos dos tipos, de forma que se presentan a continuación los diferentes tipos de dispersión:

- Dispersión selectiva de Rayleigh: afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas y se produce por la interacción de la radiación electromagnética con las partículas de la atmósfera de manera que el tamaño de las partículas es más pequeño que las longitudes de onda de la radiación y se cumple que a longitudes de onda más pequeñas hay más dispersión. Este efecto demuestra el color que vemos en cielo, ya que la longitud de onda del azul es la más pequeña y por lo tanto en la que más se produce dispersión. En la siguiente figura vemos una representación del principio de Rayleigh en donde a longitudes de onda más cortas, y más pequeñas en relación al tamaño de las partículas, afecta más la dispersión

Figura 8. Dispersión selectiva de Rayleigh. (a) Luz azul 0,3-0,4 μm. (b) Luz roja 0,6-0,7 μm

- Dispersión selectiva de Mie: se produce cuando las longitudes de onda de la radiación que entra es similar al tamaño de las partículas. Este efecto ocurre en las zonas más bajas de la atmósfera generando un efecto de neblina. Influye sobre la región espectral desde el ultravioleta hasta el infrarrojo próximo.
- Dispersión no selectiva: afecta a todas las longitudes de onda, es decir, este efecto es independiente del tamaño de la longitud de onda generando una disminución de la radiación y por lo tanto una atenuación en la señal electromagnética. El ejemplo más claro de esta dispersión es el de las nubes, ya que se produce dispersión en todas las longitudes de onda las vemos de color blanco.

42.2.3. Emisión atmosférica

Ya que todos los componentes de la atmósfera están por encima del cero absoluto emiten energía en distintas longitudes de onda, de modo que se suma a la energía que recibe el sensor y altera la respuesta que llega desde la superficie terrestre. Este efecto debe corregirse de forma que se separe la temperatura de la atmósfera de la de la superficie observada para obtener una imagen de la superficie observada libre de distorsión.

En resumen, podemos decir que el *efecto atmosférico* es la suma de la absorción, dispersión y emisión atmosférica que alteran la respuesta que obtenemos de la superficie terrestre. Las formas de corrección o atenuación de este efecto evalúan las características de la atmósfera a partir de medidas sobre superficies estudiadas en donde se puede conocer la respuesta a priori y

medidas sobre la propia atmósfera para obtener modelos que posteriormente serán utilizados como patrones para realizar las correcciones sobre las imágenes obtenidas.

42.3. Interacción de la radiación electromagnética con la superficie terrestre

La base del estudio de la teledetección consiste en la obtención de las diferentes respuestas de las distintas cubiertas de la superficie terrestre caracterizadas cada una por su *signatura espectral*.

En este caso nos referimos a las respuestas que obtenemos para las longitudes de onda que pueden ser observadas en el dominio óptico del espectro electromagnético, son las longitudes de onda observadas que dependen de la radiación solar. Observando la Figura 2, vemos que en el máximo de energía en la curva correspondiente a la temperatura del Sol tenemos un rango de longitudes de onda con máximo en 0,48 μm. La mayor parte de la energía pertenece a la región del visible, una parte al infrarrojo y en menor proporción al ultravioleta, rayos X y rayos γ, pero es en la banda de 0,3 a 2 μm donde presenta una elevada emitancia y constituye lo que se llama dominio óptico del espectro.

Ya se vio en el apartado 2 (expresiones 11 y 12), cómo el flujo de radiación electromagnética interacciona con la superficie terrestre, en donde teníamos un flujo incidente sobre una cubierta, donde parte de él va a ser reflejado, otro parte absorbido y otra parte transmitido, generalmente, en otras formas de energía. Es decir, obtenemos una reflectancia, una absorbancia y una transmitancia del flujo incidente. Las proporciones de cada uno de ellos dependen de muchos factores, entre ellos, de las características de la superficie y de la longitud de onda de la radiación.

Para identificar las diferentes cubiertas de la superficie terrestre se utilizan signaturas espectrales tipo (Figura 9), que han sido medidas en laboratorio o directamente sobre la propia superficie. A partir del estudio de estas signaturas se pueden elegir las longitudes más adecuadas para el estudio de cada cubierta.

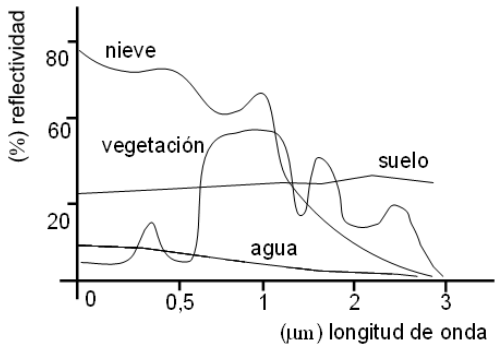


Figura 9. Signaturas espectrales tipo para distintas cubiertas de la superficie terrestre

Para la descripción de las respuestas espectrales que ofrecen los diferentes tipos de cubiertas terrestres es importante señalar los factores que modifican la cantidad de energía que recibe el sensor y por lo tanto que modifican la signatura espectral de las diferentes superficies.

Uno de los factores que afecta a la cantidad de energía que recibe el sensor después de la reflexión sobre la superficie depende del ángulo de reflectancia. Este parámetro depende a su vez de la rugosidad del terreno. Una superficie especular (ver Figura 6), refleja la radiación con el mismo ángulo de incidencia mientras que una superficie rugosa lo hace de forma dispersa, variando el ángulo de reflexión en muchas direcciones. Se utiliza el denominado *factor de reflectancia* para cuantificarlo y expresa la cantidad de flujo reflejado por una superficie respecto de una superficie lambertiana que refleja el 100% de la energía incidente.

Junto con la geometría de la superficie existen otros factores que modifican la signatura espectral como son: variaciones en la altura del Sol, topografía del suelo (orientación, pendiente), condiciones atmosféricas, condiciones fenológicas (diferentes estados biológicos de la cobertura vegetal) y diferentes sustratos edáficos (variación en las densidades y composiciones de los suelos).

Todos estos factores afectan de modo que la curva espectral real obtenida va a diferir de las curvas de referencia mostradas en la Figura 9 que únicamente deben tomarse como curvas de reflectancia de referencia y también, como ya se ha citado anteriormente, nos permiten seleccionar las bandas más adecuadas para nuestros propósitos.
Como referencia, vamos a definir el comportamiento teórico de algunas unidades básicas medioambientales que nos podemos encontrar en la superficie terrestre, como son la vegetación, el suelo y el agua, y que observamos en el dominio óptico del espectro.

Para el estudio del comportamiento de la vegetación se tiene en cuenta principalmente la cubierta vegetal (estado de las hojas); su estado fenológico (en qué grado afecta a la

reflectividad), su forma y su contenido en agua. Además, las características morfológicas de la planta (altura, grado de cobertura), la geometría de la plantación y la topografía del emplazamiento. De forma que habrá que establecer diferentes configuraciones de estos parámetros y realizar las correspondientes curvas espectrales.

Por ejemplo, para una vegetación sana (Figura 10), la curva muestra una reflectancia baja para la zona del visible y una zona de alta reflectancia en la zona del infrarrojo cercano que va disminuyendo hacia el infrarrojo medio debido al contenido de agua en la hoja (zonas de absorción).

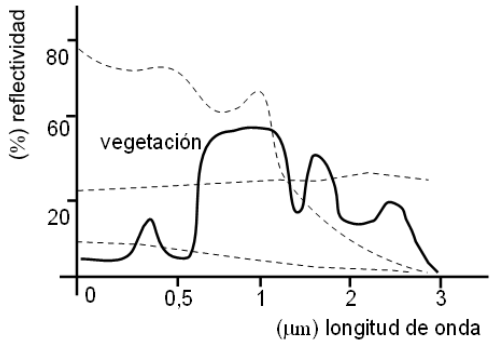


Figura 10. Reflectividad de la vegetación

Existen varios índices definidos a partir de la observación remota en diferentes bandas del espectro que ayudan al estudio de la cobertura vegetal, por ejemplo, el índice foliar para determinar la superficie de hojas que soporta la unidad de superficie de suelo, utilizada para el estudio de evolución de la vegetación, tenemos también índices basados en cocientes; el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) donde valores altos indican gran desarrollo de la cubierta vegetal y valores próximos a cero se relacionan con suelos desnudos.

En el caso del suelo, la radiación incidente puede ser absorbida o reflejada. La primera es la que ayuda a mantener la temperatura del suelo, esta energía absorbida no es detectable de forma directa. El estudio de la reflectancia del suelo es complicado debido a que la mayor parte de él está enmascarado por la vegetación pero su observación es posible a través de las características detectadas en la observación de la vegetación.

La naturaleza de los suelos es bastante heterogénea donde influyen muchos factores que deben ser tenidos en cuenta para su caracterización: su composición química, los minerales que contiene, la materia orgánica producto de la descomposición química, contenido en agua y propiedades físicas (textura, estructura, color, variabilidad).

En el caso de suelos desnudos (Figura 11), la respuesta espectral es bastante uniforme y presenta una reflectividad media. Los principales factores que afectan a las diferentes longitudes de onda son la composición química del suelo (responsable del color que vemos), su contenido en agua y su estructura (forma y características del relieve).

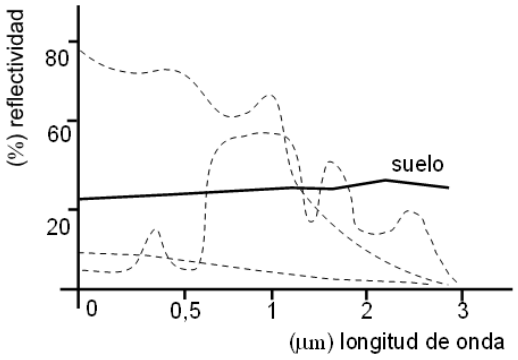


Figura 11. Reflectividad del suelo desnudo

Por último, la interacción de la radiación con las superficies acuáticas consiste principalmente en procesos de absorción o transmisión de la energía. En las longitudes más largas la absorción es mayor (Figura 12), y por lo tanto, aunque la reflectividad sea baja en casi todas las regiones del dominio óptico, en la zona de 0,4 a 0,6 μm se pueden detectar variaciones que pueden ser relacionadas con la profundidad, con el contenido de materiales en suspensión y con la rugosidad de la superficie.

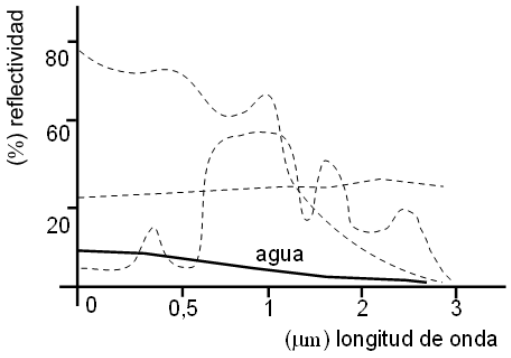


Figura 12. Reflectividad del agua

42.4. Medida de temperaturas mediante imágenes en el infrarrojo térmico: técnicas y aplicaciones

Se sabe que a temperaturas inferiores a 700 K se emite radiación en el infrarrojo. Si nos fijamos en la Figura 3, podemos ver que el máximo de la curva de emitancia para el cuerpo negro a la temperatura de la Tierra (300 K) corresponde con longitudes de onda comprendidas

aproximadamente entre los 7 y 15 μm. Esta región del espectro, denominada infrarrojo térmico, muestra con bastante claridad la emitancia de la superficie terrestre.

Anteriormente definimos la emisividad espectral de un cuerpo como la energía emitida en relación con la emitida por el cuerpo negro, en función de la longitud de onda (ver expresión (10)). Si consideramos una superficie con un espesor suficientemente grueso para que su transmitancia sea nula, el flujo incidente no reflejado será lógicamente absorbido y éste se transformará en calor y en consecuencia se eleva la temperatura de la superficie. El equilibrio térmico exige entonces una emisión de la cantidad excedente de energía absorbida llegando a que la emisividad es igual a la absorbancia ($\varepsilon=\alpha$). Entonces, la expresión (12) se transforma en:

$$\rho + \varepsilon = 1 \qquad (13)$$

es decir, que superficies muy reflectivas (como la nieve) con valores superiores al 60%, son poco emisivas y las que son poco reflectivas (como el agua) son altamente emisivas.

Además de la emisividad, el comportamiento térmico de una superficie está relacionado también con su propia capacidad térmica, con su conductividad, difusividad, la inercia térmica y el índice de calentamiento.

La capacidad térmica muestra la capacidad que tiene la superficie para almacenar el calor. La conductividad térmica determina la velocidad con que se transmite el calor por la superficie. La difusividad consiste en determinar el cambio de temperaturas que sucede en el interior de la cubierta. La inercia térmica es la resistencia que ofrece un material a cambiar de temperatura, es un efecto que depende principalmente de la variación de temperaturas del ciclo solar diario. Por último, el índice de calentamiento es una función de la intensidad radiante y de la absorbancia de la superficie.

La medida de temperaturas en la superficie es posible por el desarrollo de sensores que recogen información en los canales térmicos del infrarrojo. Para el cálculo de temperaturas de una superficie la información que recoge el sensor es el flujo radiante emitido por la superficie. Si esta cantidad de energía estuviera libre del efecto atmosférico se podría medir temperatura directamente sobre la imagen que codifica valores de radiancia correspondiente al infrarrojo térmico. La obtención de la temperatura se obtiene utilizando la ley de radiación de Planck, donde previamente se han transformado los niveles digitales de la imagen a valores de temperatura.

El sensor más utilizado para el cálculo de temperaturas de superficies es el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Este instrumento es un radiómetro que convierte radiación infrarroja observada en señal eléctrica utilizando principalmente los canales térmicos 4 y 5, que tienen las siguientes características:

Nº Canal	Resolución	Longitud de onda	Aplicaciones
1	1.09 km	0.58 – 0.68 μm	Cartografía
2	1.09 km	0.725 – 1.10 μm	Límites tierra-agua
3	1.09 km	3.55 – 3.93 μm	Detección nieve - hielo
4	1.09 km	10.30 – 11.30 μm	Temperatura de superficies
5	1.09 km	11.50 – 12.50 μm	Temperatura de superficies

Tabla 1. Canales térmicos del sensor AVHRR/3

La razón de utilizar dos canales para las medidas de temperatura es debido a que de esta manera se puede controlar el efecto atmosférico de forma que en cada píxel de la imagen se estima la corrección atmosférica por diferencia de las emisividades recogidas con ambos canales térmicos, técnica denomina *split window*, de esta forma, la temperatura en un punto viene dada por la expresión (Pinilla, 1995, pág. 278):

$$T = T_4 + A(T_4 - T_5) + B \quad (14)$$

donde T es la temperatura de la celdilla de 1km de la imagen corregida del efecto atmosférico y de la emisividad, A y B son dos factores que dependen de la emisividad de cada banda y del perfil atmosférico:

$$\begin{aligned} A &= a_0 + (1 - \varepsilon_4) + a_2 \Delta\varepsilon \\ B &= 48(1 - \varepsilon_4) - 98\Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

siendo $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$, es decir, la diferencia de emisividades de los dos canales, y a0 y b0, dos parámetros que definen el perfil atmosférico. Pueden obtenerse de esta forma mapas de temperaturas con precisiones absolutas de 0,5 K.

Para aplicaciones meteorológicas, hay centros que recogen periódicamente datos de temperatura de superficie con este sensor para elaborar modelos globales de temperatura con una resolución espacial de 1º y con resolución en temperatura de 0,3 a 0,5 ºC, estos modelos son utilizados para los modelos de predicción meteorológicos.

Los datos del AVHRR también son utilizados para seguimiento de la evolución de incendios. También pueden evaluarse los daños ocasionados por un incendio siguiendo metodologías basadas en índices de vegetación determinando los porcentajes de cubierta verde (ver Chuvieco, 1996, pág. 337-338) utilizando los canales 1 y 2 del AVHRR, y posteriormente obtener las emisividades para cada píxel multiplicando el porcentaje de cobertura verde por la porción de superficie con vegetación por la emisividad media de la vegetación y el resto por la emisividad media del suelo descubierto. En las imágenes obtenidas se relaciona la temperatura de la superficie con el estado de la cobertura vegetal de forma que a mayor cobertura vegetal menor temperatura y viceversa. En este contexto de aplicación se puede estudiar la evolución del porcentaje de cubierta verde por diferencia de valores entre dos imágenes para evaluar zonas de deforestación, estudios de rendimiento agrícola, riesgo de incendios, etc.

El ámbito de estudio y de aplicación es muy amplio en la medida de temperaturas, las más extendidas son las que se han comentado para el estudio meteorológico y medioambiental sobre medios sólidos y líquidos, pero también hay aplicaciones desarrolladas más específicas como por ejemplo para medir temperaturas de las plumas de agua detectadas por la variación que presenta la temperatura en superficie para localizar acuíferos o salidas de restos de centrales nucleares. También hay aplicaciones para la determinación de temperaturas en superficies urbanas para observar la pérdida de calor en diferentes edificaciones.

Bibliografia

[1] Chuvieco, E. *Fundamentos de Teledetección espacial*. 3ª edición revisada. Ed. Rialp.Madrid 1996.

[2] NOAA Staellite and Information Service. http://noaasis.noaa.gov

[3] Pinilla, C. *Elementos de teledetección*. Ra-ma editorial. Madrid 1995.

[4] Pinilla, C. *Interacciones de la radiación en teledetección*. (Apuntes) Universidad de Jaén, 1999.

Tema 43. Técnicas de tratamiento de imágenes de teledetección. La imagen digital. Tratamiento digital de imágenes. Tratamientos previos. Realces y mejoras de imágenes

43.1. Introducción

43.1.1. La imagen como elemento de comunicación

La **imagen** es un elemento constitutivo indiscutible de todo proceso de transmisión de información (comunicación). Complementa y a veces sustituye al propio **texto**, siendo hoy día, así mismo, un complemento eficaz de la otra gran forma de comunicación **el sonido**, elementos básicos ambos de los actuales sistemas **multimedia**.

Los primeros elementos que podemos considerar como imágenes (**analógicas**) serían los dibujos, gráficos, esquemas, etcétera , los cuales, tanto su confección como su transmisión (reproducción), se realizaban y realizan en ciertos casos, completamente de forma manual.

La complejidad de su ejecución y por tanto de su reproducción variaban sustancialmente, entre otros factores, en función de si la imagen era en blanco y negro o color, dificultando y encareciendo los procesos antes dichos en función de las características de la imagen. Este escaso conocimiento de las técnicas asequibles en la utilización del color impidió y freno durante siglos que el mismo se utilizase regularmente en los procesos de producción de documentos.

La **fotografía** desde sus orígenes contribuyó de forma definitiva y eficaz a todos los procesos de producción de documentos y especialmente de imágenes.

Las **técnicas analógicas** de **fotografía, fotomecánica y fotocomposición** que en algunos casos todavía se siguen utilizando en los procesos productivos, han sido los sistemas inspiradores de los actuales **sistemas digitales** de reproducción.

Por este motivo, en este primer apartado se hace una breve reseña técnica a los sistemas analógicos de captura de imágenes (fotografía y teoría básica del color) y las técnicas de reproducción (medios tonos), como fuentes fundamentales del conocimiento digital de imágenes.

La imagen analógica fuente de información digital

Los principios de captura de información a distancia, que posteriormente se comentaran, son la base, asimismo, de la captura de imágenes fotográficas.

Los elementos fundamentales del proceso fotográfico son: la radiación electromagnética y las leyes físicas que actúan (dispersión, absorción, reflexión, etc.), el objeto a capturar y sus propiedades, el sensor (cámara fotográfica), el registro de la información (película fotográfica) y los procesos químicos de revelado y fijado de la imagen.

La energía (radiación electromagnética - Q_T) reflejada (procedente del Sol), emitida o transmitida por los objetos inciden, en diferente forma y cuantía para cada punto del objeto y por tanto en la emulsión fotográfica, (cristales de bromo $\mathbf{Br}^-$ y plata $\mathbf{Ag}^+$), produciéndose posteriormente mediante las ecuaciones clásicas de revelado y fijado la obtención de la imagen "copia" del objeto fotografiado.

Siendo:

$$\mathbf{Q_T = \hbar\, f}$$

$\hbar$ la constante de Planck

$\mathbf{f}$ la frecuencia de emisión

Las ecuaciones fundamentales que se producen en el proceso de insolación fotográfica son:

$$\mathbf{Br^- + Q_T = Br^0 + e^-}$$

Posteriormente estos electrones ($\mathbf{e^-}$) reaccionaran con los cristales de plata para obtener la plata metálica (imagen latente)

$$\mathbf{Ag^+ + e^- = Ag^0}$$

Los bromuros de plata no afectados por la radiación son disueltos y la imagen fijada (lavado fotográfico).

Las imágenes fotográficas más empleadas utilizan películas sensibles a la radiación electromagnéticas correspondiente a unas longitudes de ondas que se encuentran entre los 420nm a 700nm, que se conoce normalmente como **espectro visible** dentro del dominio óptico del espectro (películas pancromáticas, B/N y color). En algunas aplicaciones especiales se utilizan películas con diferentes emulsiones sensibles a otras longitudes de onda: pequeña

longitud de onda (Rayos X) en medicina o con mayor longitud de onda (infrarrojo) en estudios medioambientales.

La diferencia fundamental con la **imágenes digitales** (imágenes discretizadas en niveles), que posteriormente se abordan, es el considerarlas como **imágenes continuas**. Este concepto es relativo, debido básicamente a que es continua a escala macroscópica, a nivel molecular (tamaño de los cristales de plata) sería igualmente una imagen discreta. La sensibilidad de la película nos condicionará unos cristales mas o menos gruesos en función de ser mas o menos sensibles.

Esta sensibilidad estará relacionada con la **resolución** espacial de la película. Cuanto mayor sea la sensibilidad menor será la resolución de la película. La sensibilidad de la película condicionará, por tanto, la máxima resolución que podría ser escaneada en el proceso de conversión Analógico/Digital. La resolución de las películas fotográficas se expresan normalmente en **líneas por milímetro o pulgada (lpm - lpp).**

La resolución actual de las películas fotográficas, especialmente para sensibilidades pequeñas y medias, suelen tener una resolución superior a la agudeza visual del ser humano (0,2 mm), al menos para formatos finales de reproducción iguales o menores del DIN A4.

Para la obtención del color y su posterior reproducción, conviene recordar los sistemas fundamentales de representación de colores:

Modelo de color aditivo: Para su obtención se parte del color negro (ausencia de colores primarios) y por adición (en partes iguales) de los colores rojo (R), verde (V) y azul (A) obtendríamos el blanco. Este modelo está basado en las teorías de C. Maxwell desarrolladas en 1861.

Este modelo es el empleado en los sistemas que utilizan fuentes de luz (proyectores, monitores, etc.).

El modelo aditivo dará origen a las **técnicas multiespectrales.**

Modelo de color sustractivo: Partiendo del color blanco, vamos restando colores añadiendo las tintas básicas fundamentales, amarillo (Y), magenta (M) y cian (C). Esta combinación se conoce como **tricomía.**

Las tintas en este contexto actuarían como auténticos filtros de la luz (sustracción), absorbiendo el color complementario y reflejando el resto, que al incidir sobre los **conos** de la parte interna de la retina nos formarían, por adición, el color definitivo.

Esta mezcla de tintas puras en partes iguales nos dará, por tanto, el negro. Como es difícil obtener tintas puras, lo que realmente se obtiene es un gris oscuro (falta de contraste), solucionándose el problema añadiendo una nueva tinta negro (K) a la tricomía anterior. Este nuevo modelo se conoce como **cuatricomía**, siendo el sistema normal de reproducción en litografía así como en las impresoras que utilizamos en los equipos informáticos.

El modelo sustractivo dará origen a las **técnicas multicapa.**

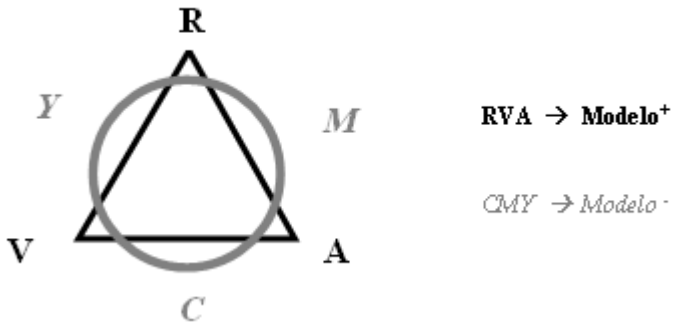


Figura 1. Modelo sustractivo

Finalmente conviene resumir los **modelos cromáticos** más empleados en la **observación** por parte del ser humano:

- En la naturaleza existen mas de 16 millones de colores.
- En los monitores utilizando el modelo aditivo RVA con 8bits por pixel, existen 16 millones de colores.
- En los sistemas de impresión el modelo sustractivo CMYK se emplean menos de16 millones de colores.

Los modelos cromáticos definirán un **espacio cromático** en el que se desarrollaran los sistemas de **medida del color** con vistas a su manipulación y normalización (Cubo de Hickethier, Triángulo CIE, Cono de Ostwald, Sólido de Munsell, Gama Pantone, etcétera.).

La reproducción de imágenes

Para la reproducción analógica de imágenes se hace imprescindible

discretizar la "imagen continua" fotográfica en pequeñas unidades (**medios tonos**) que posibiliten su impregnación o relleno por la tinta correspondiente.

Los métodos analógicos se han basado en las técnicas fotográficas mediante la utilización de los siguientes componentes:

- Fuente de luz específica.
- Película original.
- Trama grabada sobre soporte transparente. Expresada en líneas por pulgada – **lpi** –.
- Película resultante (tramada con **medios tonos**).

La luz producida por la fuente correspondiente atraviesa la película original (en diferente cantidad según las diferente gamas de grises/color) se difracta al atravesar la trama, obteniéndose finalmente una imagen tramada analógica (discretizada) de la original con diferentes porcentajes según la cantidad de luz recogida en la película resultante.

Tanto los procesos fotográficos como los de su transformación a medios tonos para la reproducción, se han visto completamente mejorados y agilizados con la introducción del **tratamiento digital de imágenes** que posteriormente se describen.

43.1.2. Tratamiento digital de señales

Los diferentes componentes de un sistema de información, especialmente los que hoy día intervienen mas en la producción electrónica de documentos (texto, imágenes, gráficos, etc), así como en la transmisión y comunicación del mismo, son susceptibles de ser estudiados como **señales digitales**.

Una **señal** sería la expresión de una determinada variable (sonido, imagen, temperatura, movimiento, etc.) en función de otra u otras variables (coordenadas, tiempo, amplitudes, frecuencias, etc.).

Existen señales de una sola dimensión, como es el caso de la voz (dimensión temporal) y señales que dependen de varias variables, por ejemplo, las imágenes digitales tanto estáticas (de 2 dimensiones - f(x, y) -, dimensión espacial) como dinámicas (de 3 dimensiones – f(x, y, t) -, siendo “t” el tiempo).

Una fase fundamental en la producción de documentos electrónicos (digitales), en aquellos casos que la fuente de información fuese analógica, sería por tanto, la **conversión** de dicha información (señal analógica) en digital mediante convertidores –**ADC**– (cuantificadores y codificadores), como por ejemplo: escaner, digitalizadores, etcétera.

La **cuantificación** tiene por objeto el **muestreo** de la información analógica original y, por tanto, una **discretización** (función del tiempo o el espacio, para el caso de audio e imagen respectivamente). La **codificación** (número de bits por muestra) se encargará de hacer reproducible y fácilmente procesable dicha información discretizada, facilitando igualmente su almacenamiento y transmisión.

Todo proceso de cuantificación (convertidores de una señal de entrada en otra de salida según una ecuación dada) lleva consigo una generalización de la información y por tanto se pueden considerar a los cuantificadores como sistemas potentes de compresión.

Las **imágenes digitales** son una transformación (discretización) de las imágenes originales fotográficas (analógicas) en digitales mediante un escáner (ADC), o bien son en si mismas digitales si proceden, por ejemplo, directamente de un barredor multiespectral (caso de la teledetección) o cámara digital.

En cualquier caso se puede considerar de forma genérica como una matriz (bidimensional) discretizada en niveles de grises –**NG** (valor radiométrico)– con una expresión, por celda (cada celda/elemento de la matriz se denomina pixel -**s**-), del tipo:

$$\mathbf{NG = f(x,y)}$$

$$f(x, y) \cong \begin{vmatrix} f(0, 0) \ldots\ldots\ldots\ldots & f(0, M-1) \\ \vdots & \vdots \\ f(M-1, 0) \ldots\ldots\ldots\ldots & f(M-1, M-1) \end{vmatrix}$$

Imágenes de M x M pixeles (M filas y M columnas)

Si estamos hablando de una imagen fotográfica o de una imagen de satélite, por ejemplo, cada pixel representa un valor de la **radiación electromagnética total reflejada – Q –** por cada pixel en un instante dado.

NG = f(x, y)=f (energía radiante recibida,Q) = i (x, y). r (x, y)

Siendo:

$i(x, y) = f$ (iluminación) $\quad 0 < i < \infty$

$r(x, y) = f$ (reflectancia del objeto) $\quad 0 < r < 1$

Su tamaño tendrá que ver, asimismo, con la resolución espacial (espaciamiento muestral) de la imagen. En imágenes escaneadas se expresa por **- spi –,** pixeles por pulgada. Como luego se estudiará, este valor estará relacionado con los valores de reproducción – **dpi,** puntos por pulgada y **- lpi-,** líneas por pulgada (**medios tonos digitales**).

De forma semejante, el **sonido** (analógico) no es mas que una **tensión variable** en función del tiempo (unidimensional), transmitida por el espacio. Esta tensión seria transformada en señal eléctrica (en un micrófono), para posteriormente convertirla en señal digital. Esta señal **H** estará muestreada (discretizada) según intervalos de tiempo **(**Periodo de muestreo **–P_m-)** mediante el empleo de convertidores analógico/digitales –ADC–.

El convertidor –ADC– de sonido constará, por tanto, de las siguientes fases:

- Cuantificación mediante el muestreo (en función del tiempo) de la señal (tensión) y a continuación discretización de la amplitud.
- La codificación en este caso necesita un elevado número de bits (> 16 bits) con vistas a obtener una adecuada calidad del sonido.

El proceso de cuantificación no es lineal y su expresión sería del tipo:

$\mathbf{H_i = x(i)}$ adquirido en el instante $t = i\,P_m$

$\mathbf{H[n] = x_i \cong x\,(t)}$ siendo $t = n\,P_m$

Asigna a la muestra "n" el valor x_i en un instante dado según un período de muestra P_m.

41.1.3. El hombre como sistema emisor/receptor de señales

El sistema **visual** del ser humano tiene unas características específicas (limitaciones) que conviene recordar en cuanto a su relación directa, tanto con los **sistemas digitales** sobre los que interactua, como con los documentos analógicos de consulta o explotación (texto, gráficos, mapas, etc.) obtenidos a partir de información digital previa.

Consideraremos que respecto a la resolución espacial, la **agudeza visual (av)** del hombre es capaz de separar 5 líneas por mm. Dado que ello conllevaría a separar 5 líneas negras y 5 líneas blancas (con un criterio digital), implica, por tanto, que la **unidad más pequeña** que el ser humano separa sería de 100 μm (asemejable a pixeles de 100 μm).

Con respecto a una adecuada **identificación** de objetos se suele aconsejar que la unidad más pequeña se divida entre 4 (25μm) obteniéndose la unidad mínima de resolución (UMR) equivalente en muchos casos a la unidad de escaneado.

Podría deducirse, por tanto, que todos los procesos de tratamiento digital de imagen deberían llevarse a cabo entre los 25μm y 100μm (correcciones, transformaciones, filtros, remuestreos, etc.).

Respecto al color, nuestra percepción dentro del espectro electromagnético se limita al intervalo del visible (0,4-0,7 μm), dentro del óptico (0,3 μm –1 mm de longitudes de onda).

Podemos observar, por proyección (modelo aditivo del color), la descomposición de la luz (radiación electromagnética) en rojo, verde y azul (RVA). Asimismo, por reflexión (modelo sustractivo del color) la recomposición de la luz mediante la impresión de tintas amarillo, magenta y cyan (YMC).

No obstante, se puede resumir que nuestras limitaciones en cuanto a color están por debajo de los 7 millones de colores y un máximo de 200 niveles de gris (NG). Recordemos que con 8 bits/pixel en cada uno de los tres colores aditivos (RVA) sería susceptible de representarse 16 millones de colores y 256 NG por pixel.

Nuestro sistema auditivo, se encuentra en cuanto a emisión de voz entre los 50 Hz y 7 000 Hz, con un margen dinámico de 96 dB (tendrá repercusiones sobre el número de bits que se

necesitan en el proceso de cuantificación para registrar dicho margen) y que las frecuencias audibles (recepción) se encuentran entre los 20 Hz y 2 000 Hz.

El sonido se transmite por el espacio como una onda de presión a una velocidad de 340 m/s.

Los mensajes no son más que una característica del sonido en un orden prefijado (según cada idioma).

41.2. La imagen digital

La imagen digital la consideramos, por tanto, como una matriz numérica bidimensional (discretizada en niveles de grises -NG- por pixeles).

En una imagen digital se hace necesario conocer y/o definir tanto su **codificación** (niveles de grises/colores = radiometría de la imagen), **estructura** y **formato**, que se describirá a continuación, como su **resolución**, función de la fracción de muestreo (por ejemplo, pixeles por pulgada –**spi**–). Este último punto estará relacionado tanto con la escala gráfica (tema importante especialmente en los documentos cartográficos), como con el tamaño de observación y/o reproducción de forma general.

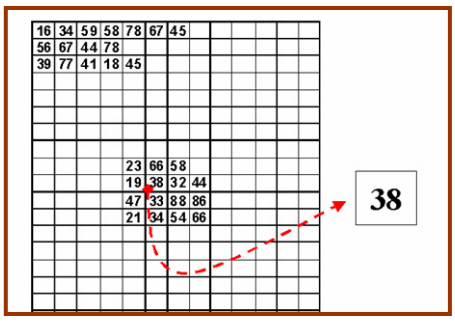


Figura 2. Imagen digital (forma decimal).

41.2.1. Códigos, estructuras y formatos

Cada elemento/celda de la misma (s) y el conjunto de dicha matriz (filas, columnas) podrán estar, en función del dato capturado, **codificados**, **estructurados** y **formateados** de diversas formas, tanto para los diversos sistemas de almacenamiento y tratamiento informáticos, como para los diversos sistemas de explotación.

Los datos a **codificar** como pixeles de la imagen se realiza en forma binaria, según un número de bits por pixel (profundidad del píxel/radiometría de la imagen).

La **estructura** de datos vendrá condicionada por su distribución interna (secuencial, jerárquica) y por su orden de grabación, pixeles por cada plano, banda o color.

Así, por ejemplo, para una imagen con 1 bits de profundidad podemos obtener 2 niveles de grises por pixel (2^1= 2 NG). Este caso se conoce como una imagen **bitmap** en blanco y negro. A medida que aumentamos la profundidad del pixel iremos teniendo una gama de grises más amplia por pixel. Recordando que el hombre es capaz de observar hasta 200 NG, implicaría que para una adecuada representación de una imagen en niveles de grises sería conveniente tener una profundidad de 8bits/s (2^8 = 256 NG).

Para imágenes fotográficas en color se necesitarían 3 planos por imagen y visualizados, por proyección, según la secuencia rojo, verde y azul (RVA) correspondiente. Esto implicaría que si están codificados en 8 bits/s cada plano, obtendríamos hasta 256^3 de colores (16. 10^6 colores).

Los **formatos** de almacenamiento y presentación de dichas imágenes son de gran importancia tanto por su tratamiento, como para la transmisión de los mismos.

Los formatos se seleccionan con criterios de:

- Calidad: Resolución admitida
  Profundidad del pixel
  Capacidad de calibración
  Capacidad de corrección
- Flexibilidad: Adaptación al cambio de formato entre plataformas
- Eficiencia: Al cálculo, almacenamiento y transmisión

Los formatos de imagen más extendidos son: TIFF, PCX, GIF, EPS, PSD, BMP, IMG, JPEG, MPEG, ECW, MrSID, etcétera.

41.2.2. Compresión de imágenes

El objetivo de la **compresión** de imágenes es la reducción del número de bits con vistas a transmitir o almacenar dicha imagen en condiciones óptimas para el fin requerido.

Los métodos de compresión se clasifican, de forma resumida, en:

Compresión sin pérdidas

Se utilizan normalmente en compresión de texto. Emplean normalmente estadísticas de los valores que se repiten.

Son sistemas que nos permiten volver a la imagen original sin pérdidas. Bien es verdad que en algunos casos la compresión es mínima.

Los más significativos serían: Técnicas de "**codificación entrópica**" es función de la frecuencia de aparición de cada símbolo, dedicando menos bits a símbolos con mayor frecuencia (Teoría de Shannon), utilizada en fax y gráficos, **RLE** (bitmap), **Huffman** (texto).

La tasa de compresión es del orden máximo 1:5.

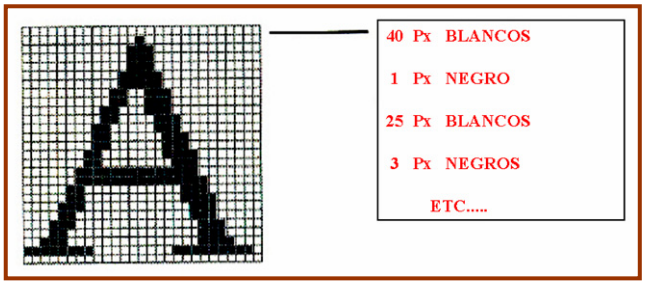


Figura 3. Compresión de imágenes. Compresión "RLE".

Compresión con pérdidas

Son métodos no reversibles aunque, como contrapartida, admiten ratios de compresión altos. Se pretende, asimismo, que la pérdida que se produce sea de forma lo más objetiva posible, teniendo que existir un compromiso a priori con la calidad de la imagen descomprimida.

Son los métodos que se emplean para la imagen y audio.

Los sistemas actuales más empleados son:

- JPEG (imágenes estáticas, compresión 1:15)

- ECW (puede llegar con gran calidad 1:50)

- MrSID (puede llegar con gran calidad 1:50)

- MPEG (imágenes dinámicas sincronizan audio y video)

Estos sistemas utilizan técnicas estadísticas junto con transformaciones de la imagen en términos de variación de brillo.

41.3. Tratamiento digital de imágenes

Una vez definida la Imagen digital como una matriz numérica bidimensional (valores discretos -NG-), los tratamientos digitales serán, por tanto, operaciones matemáticas (operadores matemáticos básicos, cálculo matricial, etc.) sobre dichos valores.

Se han clasificado y reunido los diversos tratamientos de acuerdo a las operaciones que "normalmente" se realizan sobre las imágenes digitales.

41.3.1. Tratamientos previos

En este apartado se enunciarán las correcciones geométricas más importantes usadas en el tratamiento de imágenes, con un apartado especial a la corrección de imágenes espaciales captadas por sensores remotos aerotransportados.

Las correcciones atmosféricas y radiométricas (f(NG)) que normalmente se incluyen en este apartado, son de utilización imprescindible en el campo de la Teledetección (observación de la Tierra por sensores remotos aerotransportados sobre satélites) y serán revisadas en otros temas

Transformaciones básicas

Las principales y básicas transformaciones serán geométricas (**variaciones espaciales**), como son la rotación, cambio de escala y traslación de los diferentes pixeles de la imagen en 3 dimensiones (el caso de 2D, sería una particularización del caso anterior).

Rotación

La rotación de un punto (X_{P1},Y_{P1},Z_{P1}) a otro (X_G,Y_G,Z_G), de manera arbitraria en el espacio, requiere de tres transformaciones o giros $(\omega, \varphi, \kappa)$, según los tres ejes (X, Y, Z) de coordenadas espaciales de referencia, respectivamente.

Traslación

Sería el caso de trasladar un punto con coordenadas (X_G,Y_G,Z_G) a una nueva situación mediante un desplazamiento (X_0, Y_0, Z_0).

Cambio de Escala

Serán unas determinadas variaciones (escalares - λ -) a lo largo de los ejes X,Y,Z.

Los pixeles afectados por el conjunto de estas variaciones espaciales se enunciarán de la forma siguiente:

Siendo: (X_{P1},Y_{P1},Z_{P1}) → Coordenadas imagen del pixel

(X_G,Y_G,Z_G) → Coordenadas del píxel afectadas de los 3 giros

(X_0, Y_0, Z_0) → Traslación espacial

(X_P, Y_P, Z_P) → Coordenadas finales del pixel

$$\begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix} = R_x \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \text{sen}\,\omega \\ 0 & -\text{sen}\,\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix}$$ Según el eje X

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix} = R_y \begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\text{sen}\,\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\,\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{bmatrix}$$ Según el eje Y

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi\kappa} \\ Y_{\omega\varphi\kappa} \\ Z_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \text{sen}\,\kappa & 0 \\ -\text{sen}\,\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\omega\varphi} \\ Y_{\omega\varphi} \\ Z_{\omega\varphi} \end{bmatrix}$$ Según el eje Z

Siendo el producto final de las rotaciones:

$$\begin{bmatrix} X_{\omega\varphi\kappa} \\ Y_{\omega\varphi\kappa} \\ Z_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_Z\ R_Y\ R_X \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}$$

Siendo:

$$R_Z\ R_Y\ R_X = R \quad M.ortog. \Rightarrow R^{-1} = R^T = M$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \qquad M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \lambda \; R \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ Z_{P1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix}$$

$\Leftrightarrow$

$$\begin{aligned} X_P &= \lambda . R . X_{P1} + X_O \\ Y_P &= \lambda . R . Y_{P1} + Y_O \\ Z_P &= \lambda . R . Z_{P1} + Z_O \end{aligned}$$

$$X_P = \lambda . R . X_{P1} + X_O$$

$$Y_P = \lambda . R . Y_{P1} + Y_O$$

$$Z_P = \lambda . R . Z_{P1} + Z_O$$

Transformaciones perspectivas

La transformación perspectiva proyecta un punto 3D sobre un plano. Estas ecuaciones no son lineales (implican división por valores de coordenadas).

Esta transformación es la que se obtiene cuando se captan imágenes desde sensores aerotransportados (cámaras métricas, por ejemplo).

Las ecuaciones necesarias son fruto, tanto de los principios de "proyección" como de las **variaciones espaciales** estudiadas anteriormente:

$$\begin{bmatrix} X_P - X_O \\ Y_P - Y_O \\ Z_P - Z_O \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = \lambda \; R \begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ -f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_{P1} \\ Y_{P1} \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \; R^{-1} \begin{bmatrix} X_P - X_O \\ Y_P - Y_O \\ Z_P - Z_O \end{bmatrix}$$

Operando en las ecuaciones anteriores sabiendo que Z_G = -f (focal de la camara) y despejando las coordenadas imagen:

$$X_{P1} = \frac{1}{\lambda} \left[m_{11}(X_P - X_O) + m_{12}(Y_P - Y_O) + m_{13}(Z_P - Z_O) \right]$$

$$Y_{P1} = \frac{1}{\lambda} \left[m_{21}(X_P - X_O) + m_{22}(Y_P - Y_O) + m_{23}(Z_P - Z_O) \right]$$

$$-f = \frac{1}{\lambda} \left[m_{31}(X_P - X_O) + m_{32}(Y_P - Y_O) + m_{33}(Z_P - Z_O) \right]$$

Dividiendo las ecuaciones 1ª y 2ª respectivamente por la 3ª:

$$\frac{X_{P1}}{-f} = \frac{\left[m_{11}(X_P - X_O) + m_{12}(Y_P - Y_O) + m_{13}(Z_P - Z_O) \right]}{\left[m_{31}(X_P - X_O) + m_{32}(Y_P - Y_O) + m_{33}(Z_P - Z_O) \right]}$$

$$\frac{Y_{P1}}{-f} = \frac{\left[m_{21}(X_P - X_O) + m_{22}(Y_P - Y_O) + m_{23}(Z_P - Z_O) \right]}{\left[m_{31}(X_P - X_O) + m_{32}(Y_P - Y_O) + m_{33}(Z_P - Z_O) \right]}$$

Operando de forma inversa obtendríamos:

$$X_P - X_O = (Z_P - Z_O) \frac{\left[r_{11} \; X_{P1} + r_{12} \; Y_{P1} + r_{13} \; (-f) \right]}{\left[r_{31} \; X_{P1} + r_{32} \; Y_{P1} + r_{33} \; (-f) \right]}$$

$$Y_P - Y_O = (Z_P - Z_O) \frac{\left[r_{21} \; X_{P1} + r_{22} \; Y_{P1} + r_{23} \; (-f) \right]}{\left[r_{31} \; X_{P1} + r_{32} \; Y_{P1} + r_{33} \; (-f) \right]}$$

Sabiendo que **R** es ortogonal y llamando a $\mathbf{R^{-1}} = \mathbf{M}$, obtenemos finalmente

$$X_P - X_O = (Z_P - Z_O)\frac{[m_{11}\ X_{P1} + m_{21}\ Y_{P1} + m_{31}\ (-f)]}{[m_{13}\ X_{P1} + m_{23}\ Y_{P1} + m_{33}\ (-f)]}$$

$$Y_P - Y_O = (Z_P - Z_O)\frac{[m_{12}\ X_{P1} + m_{22}\ Y_{P1} + m_{32}\ (-f)]}{[m_{13}\ X_{P1} + m_{23}\ Y_{P1} + m_{33}\ (-f)]}$$

Conjunto de ecuaciones fundamentales de la fotogrametría y en general de la orientación espacial, que relacionan las coordenadas de cada píxel en la imagen con las coordenadas terreno, en función de variaciones espaciales (giros traslaciones y cambios de escala) en un sistema proyectivo.

Correcciones geométricas de imágenes espaciales

El objetivo es el de modificar la geometría de los pixeles, ajustándolos normalmente a un sistema dado (proyección cartográfica y escala dada), manteniendo de forma más significativa la radiometría de la imagen original..

Conviene recordar que una imagen captada por un sensor/satélite, tiene los siguientes componentes:

- **Espacial** (la posición específica de cada pixel en la imagen a una resolución y un sistema de captura dados).
- **Radiométrica** (según su codificación y estructura nos definirán un rango de niveles de grises por píxel.
  Por ejemplo con 8 bits/píxel tendríamos 2^8 **N**iveles de **G**rises.
- **Espectral** (la energía total – Q – se dividirá en el momento de la captura por el sensor, en zonas del espectro electromagnético, registrándose cada zona en una banda/plano separada – Q_i –).
- **Temporal** (la información de cada píxel por banda – Q_i – y codificada en un nº. de **NG** , corresponde a un instante dado).

El proceso de corrección geométrica cartográfica se verá en temas posteriores

41.3.2. Realces y mejoras de imágenes

Los "niveles NG" de cada pixel pueden ser modificados con vistas a **mejorar o resaltar** cierta información para un estudio determinado, siendo precisamente esta modificación el concepto de "**Realce de imágenes digitales**".

Se puede definir a priori diversos tipos de realces que nos mejorarán la visualización, eliminarán ruidos, resaltarán ciertas características geométricas, etc. con vistas a obtener unos resultados determinados.

Conviene recordar asimismo que la forma más elemental de conocer una determinada imagen digital es a través de su histograma de frecuencias para cada NG, donde quedará patente tanto el "contraste" (rango entre máximo y mínimo del valor digital para cada pixel) como el nivel de radiación. Ambos conceptos permitirán a priori diseñar un tipo específico de realces.

Estos tipos de realces se pueden efectuar por software o por hardware, siendo determinante la elección de un sistema u otro, el costo y la velocidad de ejecución de dicho tratamiento digital.

Tipos de realces

De forma esquemática y basándose en la forma de tratamiento efectuado en función del número de pixeles afectados, tendremos:

- Realces radiométricos: Se conocen también como "transformación de histogramas". Se realizan específicamente sobre 1 pixel, sin tener en cuenta los de alrededor. Por lo general implican un mayor contraste.

- Realces geométricos: Se les suelen llamar simplemente "filtros", donde la modificación del nivel de gris de un pixel determinado conlleva el estudio o incidencia de los de su entorno.

A su vez se pueden dividir:

. Realces geométricos en el **"dominio espacial"**
Para unos valores de (x, y) ("distancia" del píxel al origen) la función f(x, y) nos representará la intensidad o valor del nivel de gris (NG).

. Realces geométricos en el **"dominio de frecuencias"**

Para unos valores (u, v) ("frecuencias") la función f(u, v) nos representarán "amplitudes".

Realces Radiométricos

La modificación píxel a píxel, significará que para un valor $f(x_i\ y_j)$ de entrada le corresponderá un $f'(x_i\ y_j)$ de salida (es decir un nivel de gris **NG** de entrada le corresponderá un nivel de gris **NG'** de salida).

$$\mathbf{NG = f(x_i\ y_j) \quad \rightarrow \quad f'(x_i\ y_j) = NG'}$$

Son de fácil implementación por software, confeccionándose "tablas de consulta" (LUT) donde se realizan en tiempo real dichas transformaciones.

Los más empleados son:

- Modificación de contraste (remuestreo de pixeles):

Modificación lineal: Por expansión lineal del histograma. Mejora normalmente la calidad visual de la imagen.

$$\mathbf{NG' = NG + b} \qquad b = -ma$$

Siendo: $a = \frac{255}{M-m}$

M = rango máximo de nivel de gris
m = rango mínimo de nivel de gris

Otras modificaciones serían:

En forma logarítmica, estadística, líneas con puntos de cambio de pendiente, etc.

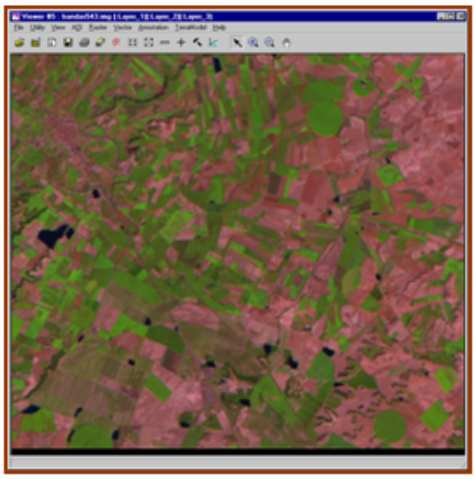


Figura 4. Visualización de la combinación de bandas 5 4 3 /RGB (Landsat TM).

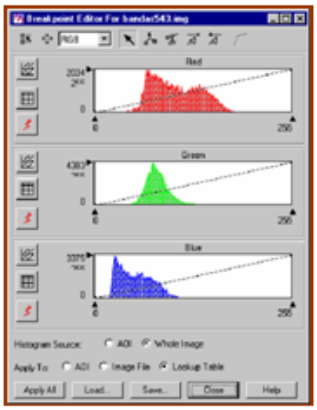


Figura 5. Histograma de frecuencias de las bandas 5 4 3.

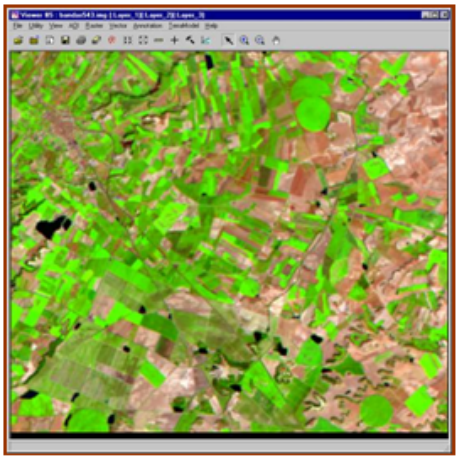


Figura 6. Modificación de contraste aplicado a las bandas 5 4 3.

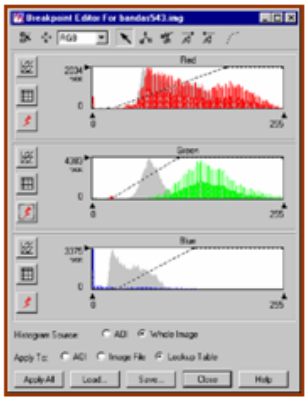


Figura 7. Histograma resultante (bandas 5 4 3 modificadas).

- Ecualización del histograma:

Como todo proceso de ecualización se pretende:

. Expandir el histograma al rango máximo posible de “NG”.

. Incrementar las frecuencias para cada NG.

Con ello conseguiremos, por tanto, una mejor "calidad visual".

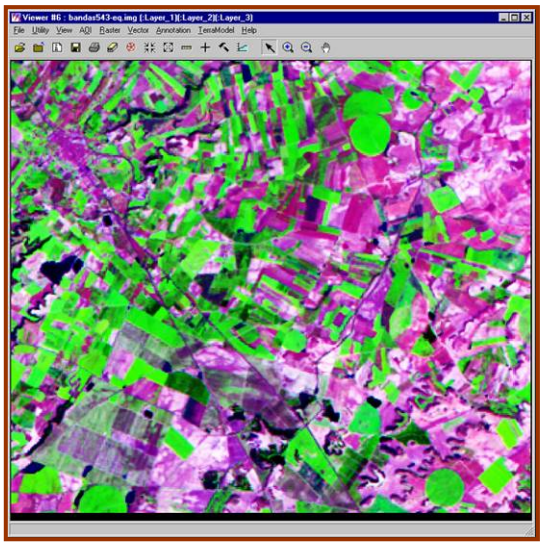


Figura 8. Ecualización del histograma (bandas 5 4 3) Lansat TM.

- Particiones de densidad (escalera)

Esta transformación se realiza dando determinados cortes por escalones (agrupando los valores de pixeles en determinados niveles de grises –NG-). Con ello se consigue un agrupamiento de pixeles según rangos radiométricos que pueden facilitar el análisis de imágenes.

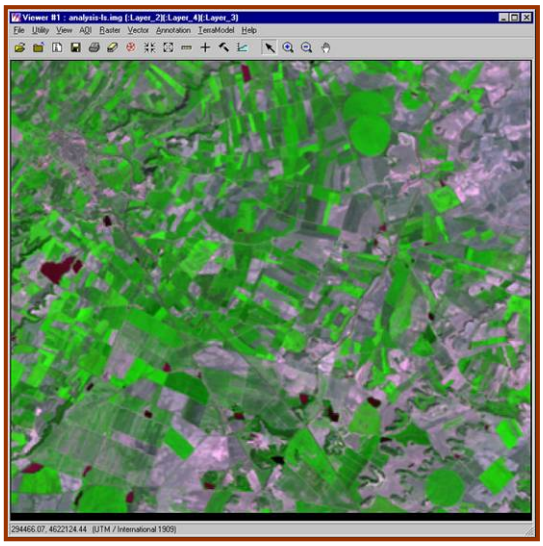


Figura 9. Análisis mediante particiones de densidad (Landsat TM).

Realces Geométricos

Como ya se ha dicho anteriormente el nuevo valor del píxel realzado **-NG´-** siempre será función de los de su entorno.

Se suelen emplear principalmente tanto para suavizar o eliminar ruidos en la imagen como para detección de bordes.

Como dicha transformación modifica todos los valores de los niveles de grises de la imagen no se deberían emplear antes de una fase de extracción de información (por ej. clasificación).

Sabiendo que una imagen queda representada por f(x,y) = NG con una variación espacial, se puede hacer corresponder dicha función a una "señal sinusoidal" con una frecuencia determinada (y por tanto con un período T).

- Si **f(x, y) es periódica**, será una función infinita de senos y cosenos con diferentes Amplitudes y Fases

(f (sen, cos)). Se conocen como **"Series de Fourier"**

- Si **f(x, y) no es periódica** de variable real e integrable (pudiendo a su vez ser continua o discreta), se puede aplicar toda la teoría de **"Transformadas de Fourier"**, cuya utilidad se verá a continuación.

Realces Geométricos en el dominio espacial

Estos tipos de realces (filtros) se caracterizan por el gran volumen de cálculo a desarrollar.

En el caso de una función discreta g(x, y), se define como "filtro lineal" (**convolución**):

$$g'_{ij}(x,y) = \sum_{-h}^{h}\sum_{-h}^{h} g_{(i+k,j+l)}(x,y) w_{Kl}$$

siendo:

i,j = imagen de i filas por j columnas

k,l = intervalo del filtro

h,-h= ventana

$W_{k.l}$= coef. de peso

En definitiva, es multiplicar dos matrices (una ventana que va recorriendo toda la imagen digital).

Los tipos más empleados de filtros son:

- Filtro de paso bajo:

. Se emplean para eliminar "ruidos"

. "Suavizan" la imagen (disminuye el contraste)

. Este tratamiento implica una pérdida de información de alta frecuencia

. Un filtro muy empleado es el "filtro de media", siendo la matriz filtro del tipo:

$$g(x, y) = 1\backslash 9 \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

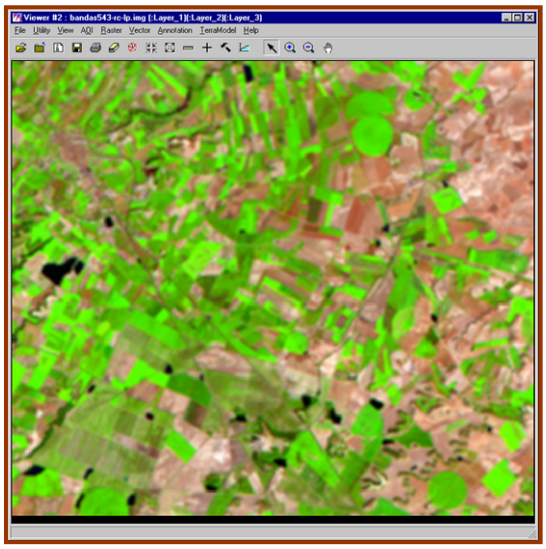


Figura 10. Realce geométrico. Filtro de paso bajo. Landsat TM.

- Filtro de mediana:

. Se suelen emplear para eliminar ruido aleatorio.

. El diseño de este "filtro" consiste en escoger **el píxel central** de los valores de la ventana (mediana).

. En este proceso se puede perder bastante información.

. Un filtro que emplea este criterio es el filtro de Tukey.

. Suele ser poco sensible a los valores extremos.

- Filtro de la moda:

. Suavizan los resultados de una clasificación o agrupamiento de pixeles.

. El operador consiste en escoger el valor **mas frecuente** de la ventana (matriz filtro).

- Filtro de paso alto:

. Es el más empleado para detectar bordes.

. Es un filtro direccionable.

. Ejemplo de este tipo, según la dirección del borde a detectar sería:

VERTICAL HORIZONTAL DIAGONAL

$$1/9.\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix};1/9.\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix};\ 1/9.\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{vmatrix};\ 1/9.\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

A este tipo corresponden los filtros de Roberts, Sobel, Prewitt, etcétera.

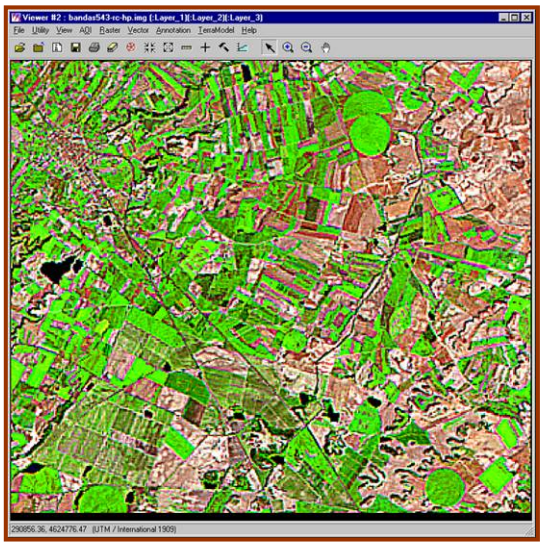


Figura 11. Realce geométrico. Filtro de paso alto. Landast TM.

- Laplacianos:

Son filtros de detección de bordes en todas direcciones.

Son complejos y de difícil implementación en un sistema. (Se resuelve mas fácilmente mediante la Transformada de Fourier).

Si la función es discreta (niveles de grises) el filtro Laplaciano sería del tipo:

$$g'_{ij} = g_{i-1,j} + g_{i+1,j} + g_{i,j-1}\, g_{i,j+1} - n.g_{ij}$$

un ejemplo de filtro sería:

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}$$

ventana i, j = 3 x 3

núcleo = 4

La expresión de un Laplaciano para una función continua

es del tipo: $$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2}$$

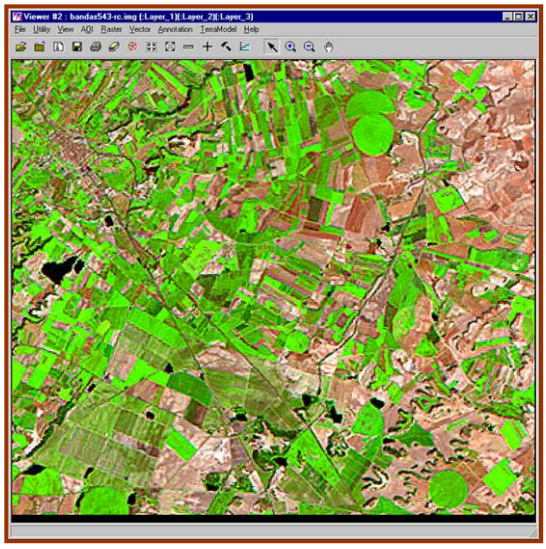


Figura 12. Realce geométrico laplaciano. Landsat TM. Ventana 3x3. Coeficiente de peso 4.

Realces Geométricos en el dominio de frecuencias

Para operar en el dominio de frecuencias primero conviene revisar como pasamos del "dominio espacial" (dominio de la imagen digital) al de "frecuencias" y después se analizarán las consecuencias de trabajar en este dominio.

Para una mejor comprensión, se explica para el caso de una función continua de 2 variables:

Dominio espacial:

Sabemos que para cada píxel (x, y) -- →. f(x, y) = NG

Siendo, NG = valor de gris.
Variando esta función a medida que nos separamos del origen.

Quedará caracterizada esta variación espacial por su:

. **Período** ; **T** = $\frac{1}{f}$; f = frecuencia

Amplitud ; **A**

Por ejemplo: si fuese de 1 variable la variación espacial quedaría representada por:

| x -- → f(x)

| Amplitud = A

Dominio de frecuencias:

Esta función f(x, y) tendría una representación en el dominio de frecuencias representado por:
(u, v) = frecuencias --□ F(u, v) = A , amplitudes

en nuestro ejemplo anterior de 1 variable, esa variación espacial queda representada en el dominio de frecuencias por 2 vectores de la forma siguiente:

$$u = \pm fo$$

$$F(u) = \frac{A}{2}$$

El pasar del "dominio espacial" al de "frecuencias" se realiza mediante la "transformada de Fourier (FT) y el contrario por la transformada inversa de Fourier (FT^{-1})".

El motivo de trabajar en el dominio de frecuencias es debido, fundamentalmente, a las propiedades de dicha transformada y en especial a la transformada inversa de Fourier que facilitarán sustancialmente tanto los procesos de "convolución" como de cálculo de "laplacianos", como veremos a continuación.

Transformada de Fourier

Para el caso de una función discreta f(x, y) de dos variables y pixeles cuadrados N x N de una imagen, la transformada de Fourier (FT) será:

$$F(u,v) = \frac{i}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\, e^{\frac{-j2\pi(ux+vy)}{N}}$$

u, v = 0,1 ... ..., N - 1

y la transformada inversa F^{-1}, (FT^{-1}):

$$F^{-1}(F(u,v)) = f(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u,v)\, e^{\frac{j2\pi(ux-vy)}{N}}$$

x, y = 0,1 ... ... , N - 1

Con lo que volvemos, por dicha F^{-1} a la función origen f(x, y) , imagen original.

La forma de operar que seguiremos en todos los procesos será siempre de la forma siguiente:

1º Pasaremos las funciones al dominio de frecuencias por la transformada de Fourier (FT).

2º Operaremos entre dichas transformadas (utilizando las propiedades de dicha transformada).

3º Volveremos al dominio espacial por la transformada inversa (FT^{-1}), obteniéndose los procesos de convolución y laplacianos del dominio espacial anteriormente explicado.

Dentro de las propiedades de la transformada de Fourier (FT) (Separabilidad, Traslación, Periodicidad, Simetría conjugada, Rotación, Distributibilidad, Escalado) resaltaremos la aplicación mas importante al filtrado de imágenes, concretamente a la "**convolución** y al **laplaciano**" estudiados en el dominio espacial, facilitando en gran medida su obtención.

Imagen $f(x, y) \rightarrow F(u, v)$ ***su correspondiente FT***

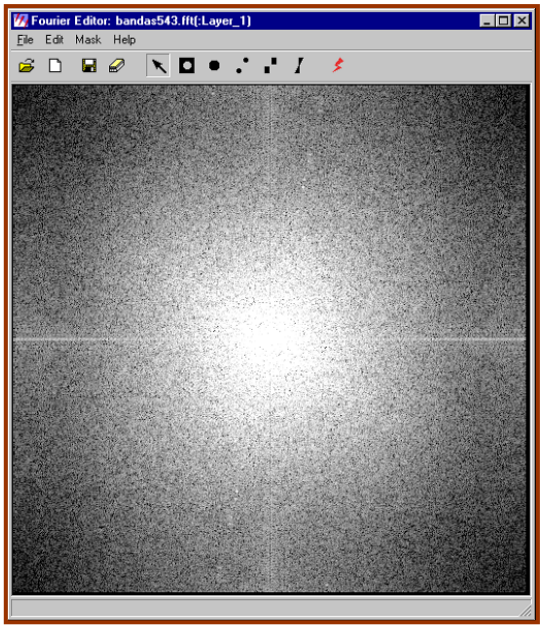


Figura 13. Visualización de la Transformada de Fourier (FT). Imagen Landsat TM.

Convolución: (Aplicación para una variable)

Sabemos que una convolución en el "dominio espacial" consistía en la multiplicación de matrices (imagen original y el propio filtro). Por ello, mediante la FT obtendremos las correspondientes a la imagen y al filtro.

Filtro $f(x_i, y) \rightarrow G(u, v)$ *su correspondiente FT*

cumpliéndose por las propiedades de la Transformada de Fourier

$$f(x, y) \otimes g(u, v) = F(u, v).\ G(u, v)$$

Siendo bastante más sencillo obtener dicha convolución por la simple multiplicación de dos transformadas de Fourier y su posterior conversión al dominio espacial por la transformada inversa.

Laplacianos:

- Se utilizan para resaltar bordes en todas direcciones

- Sabemos que el operador , para una función continua, consistía en :

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2}$$

- Según las propiedades de la FT para el Laplaciano:

$$F(\nabla^2 f) = (-2\pi)^2 (u^2 + v^2) F(u, v)$$

Obteniéndose la transformada sin mas que obteniendo la de la imagen y operando según la ecuación anterior.

- Por la (FT-1), transformada inversa se obtiene directamente el Laplaciano:

$$F^{-1} (F(\nabla^2 f)) = \nabla^2 f(x, y)$$

Luego, la forma de operar de forma mas sencilla que directamente en el dominio espacial sería:

1º Obtener la (FT) del Laplaciano $F(\nabla^2 f)$

2º Calculamos su inversa (FT^{-1}); $F^{-1}(F(\nabla^2 f))$

Obteniéndose directamente el Laplaciano $\square^2$ f.

Bibliografia

[1] GONZALEZ, R.C. and WINTZ, P.: Digital Image Processing. ed.: Addison-Werley.

[2] JENSEN, J. R.: Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. ed.: Prentice-Hall.

[3] MARION, A..: An Introduction to Image Processing. ed.: Chapman and Hall.

[4] SCHOWENGERDT,R.A.: Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing.

Tema 44. Tratamientos radiométricos de imágenes de Teledetección. Correcciones por la geometría de la toma: topografía, BRDF. Correcciones atmosféricas. Cálculo de reflectividades. Radiometría de campo y laboratorio: técnicas, instrumentos y aplicaciones.

44.1. Tratamientos radiométricos de imágenes de Teledetección

Con el término "correcciones radiométricas" se define el conjunto de las técnicas que modifican los Niveles Digitales (ND) originales, registrados por los sensores, con el objetivo de acercarlos a los que se obtendrían en el caso de una recepción ideal. Estas técnicas incluyen el tratamiento de los problemas radiométricos, derivados del mal funcionamiento del sensor, y la obtención de magnitudes físicas (radiancia y reflectividad). Las correcciones atmosféricas y el cálculo de reflectividades se tratarán en los apartados siguientes.

El mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora puede causar la pérdida de píxeles o líneas enteras de la imagen. En este caso la imagen presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de píxeles aislados de aspecto muy contrastado con los vecinos (efecto conocido como de "sal y pimienta"). En ambos casos se trata de información irreparablemente perdida, porque nunca fue registrada. Por lo tanto los procesos de corrección se dirigen a mejorar artificialmente el aspecto visual de la imagen, facilitando su posterior interpretación. La forma más lógica de estimar los ND de estos píxeles erróneos se basa en considerar los ND de los píxeles vecinos. De acuerdo al conocido fenómeno de la auto-correlación espacial, muchas variables geográficas tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio. De igual forma, los valores de radiancia provenientes de una parcela de la superficie terrestre tienden a estar positivamente correlacionados con los provenientes de las parcelas vecinas. Por ello, parece razonable estimar los ND de las líneas perdidas a partir de los ND de las inmediatas. Este criterio de vecindad puede introducirse de distintas formas. La más sencilla es sustituir el ND de cada línea/píxel por el de los precedentes o posteriores.

Un segundo método sería promediar los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa. En este caso el resultado del promedio debe convertirse en el número entero más cercano. Este segundo método resulta más arriesgado que el primero, sobre todo en aquellos casos en donde es menos claro asumir una auto-correlación espacial.

Un tercer método de recuperar la información perdida utiliza una banda auxiliar altamente correlacionada con la que presenta problemas. A partir de esta banda auxiliar, se estima el valor de los píxeles defectuosos. Al igual que el caso anterior, el resultado debería convertirse al valor entero más cercano.

En cualquiera de los tres algoritmos se asume que las líneas defectuosas ya han sido localizadas. Esto puede ser una tarea trivial en algunos casos, pero en otros puede resultar bastante complejo. Para ello puede emplearse un método de búsqueda automática, que parte de comparar la media aritmética de cada línea con la de las líneas anterior y posterior. Si difiere de ellas significativamente (por encima de un umbral fijado) se realiza un estudio más detallado de los ND que la componen, con el objetivo de detectar los valores anómalos. Si estos aparecen, puede considerarse que aquella línea está afectada por algún tipo de error, y aplicarse sobre ella uno de los algoritmos previamente tratados. Lo mismo cabe decir respecto a píxeles que muestren un valor anómalo. En estos casos será aún más complicado localizar visualmente los píxeles erróneos. En la mayoría de estos casos se utiliza un método de búsqueda automática, basado en detectar aquellos píxeles que cuenten con un ND significativamente más alto o más bajo que el promedio de sus vecinos (calculado, normalmente, a partir de una ventana móvil de 3 x 3 píxeles). Una vez individuado el píxel anómalo, el ND se sustituye por el ND medio de los píxeles vecinos.

Otro tipo de error que se puede encontrar en las imágenes, sobre todo en las obtenidas por equipos de barrido secuencial (como los primeros sensores Landsat-MSS), es el bandeado. Este problema conocido como *striping* en la terminología anglosajona, se debe al mal calibrado entre los detectores que forman el sensor. Este fenómeno es más evidente en las zonas de baja radiancia, como las láminas de agua. Cuando los detectores presentan inconsistencias, aparecen en la imagen unas líneas más oscuras o más claras que el resto. Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los detectores se asume que todos ellos, caso de estar bien calibrados, tenderían a presentar similares histogramas. Basta, por tanto, recomponer el histograma de cada detector, respecto a otro tomado como referencia. Lo más habitual es que el histograma de referencia sea el del conjunto de la imagen, formado por todas las líneas que la componen. La forma más sencilla de realizar el ajuste se basa en aplicar unos coeficientes lineales (sesgo y ganancia) a los histogramas de cada detector, con el objetivo de igualar sus medias y desviaciones típicas con las del histograma de referencia. Aunque existen otros procedimientos no lineales, este método ofrece, en la mayoría de los casos, buenos resultados. Su proceso parte de calcular la media y desviación típica de cada histograma parcial (correspondiente a los píxeles codificados por un determinado detector). Posteriormente, para ajustar estos valores a los encontrados para el histograma de referencia basta aplicar:

$$(1)\quad \begin{aligned} b_i &= s/s_i \\ a_i &= \overline{ND} - b_i\,\overline{ND_i} \end{aligned}$$

donde s y s_i indican las desviaciones típicas del histograma de referencia y parcial, respectivamente; $\overline{ND}$ y $\overline{ND}_i$, los ND medios para ambos, a_i y b_i los coeficientes de ajuste. A partir de estos coeficientes puede calcularse el valor corregido, aplicando una sencilla función:

$$(2)\quad ND'_{i,j} = a_i + b_i ND_{i,j}$$

donde el ND de salida se calcula a partir de la aplicación de unos coeficientes de ajuste al ND de entrada.

44.2. Correcciones por la geometría de la toma: Topografía, BRDF

El comportamiento espectral de una determinada cubierta viene determinado, no sólo por sus propias características (propiedades físicas, químicas,… de la cubierta), sino por otra serie de factores 'externos' que modifican su comportamiento espectral 'teórico'. Entre estos factores podemos mencionar (Chuvieco, 2002):

- Ángulo de iluminación solar, muy dependiente de la fecha del año y del momento de paso del satélite.
- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación: orientación/pendiente.
- Efectos atmosféricos, especialmente debido a la absorción causada por las nubes y a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.
- Variaciones medioambientales de la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad, fenología,…
- Sustrato edafológico o litológico. Este efecto es especialmente influyente cuando la densidad de la cubierta vegetal observada en media.

La figura siguiente muestra los efectos comentados. A estos efectos habría que añadir los efectos causados por la irradiancia difusa, lo que hace que incida radiación procedente de cubiertas vecinas, o bien dispersada por la propia atmósfera. Todos estos factores arriba mencionados, aumentarán la complejidad de la caracterización de un tipo de cubierta mediante la teledetección.

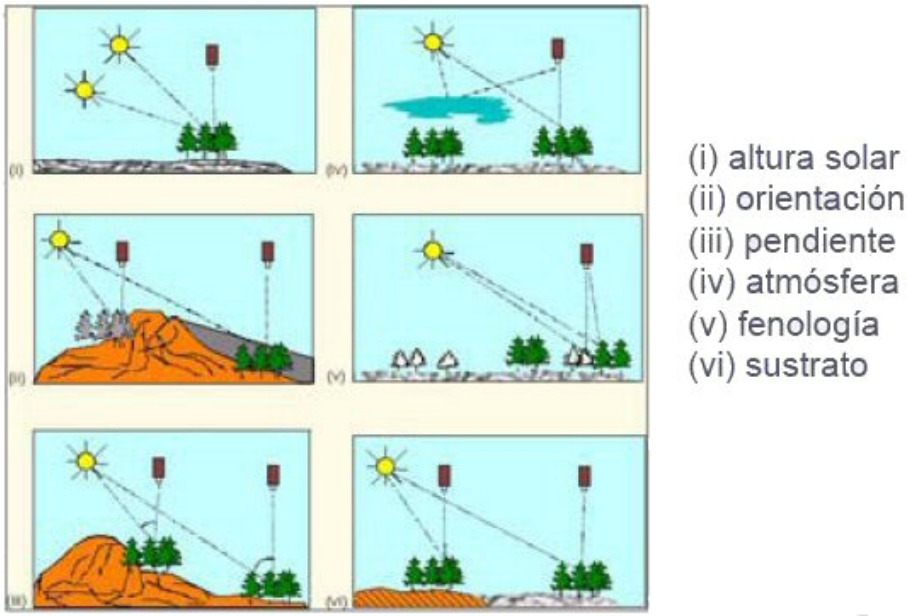


Figura 1. Factores externos que afectan a la reflectividad captada por el sensor (fuente, Chuvieco, 1996, pag. 91)

A continuación describiremos en más detalles los efectos ocasionados por la topografía y la geometría de observación, así como algunos métodos para corregirlos.

Topografía

La reflectividad es muy dependiente de los ángulos de incidencia y observación. Si asumimos un terreno completamente llano podríamos, en una primera aproximación, asumir que la reflectividad sólo depende de la elevación solar. Sin embargo, la pendiente y su orientación ejercen un efecto notorio sobre la reflectividad, especialmente en las zonas de sombra. En un terreno montañoso la pendiente modifica la geometría del flujo incidente (figura 2), de manera que en las laderas orientadas al sol el ángulo cenital no coincide con el ángulo de incidencia, mientras que las opuestas puede ocurrir que no se reciba energía solar directa.

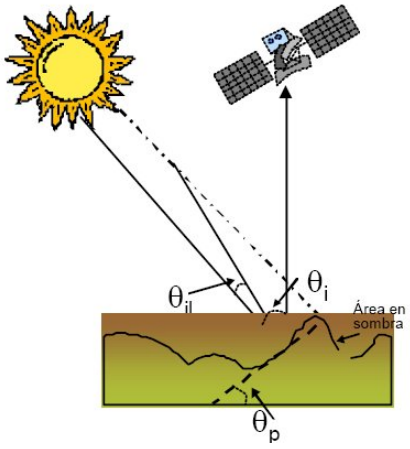


Figura 2. Geometría de adquisición en terrenos montañosos (tomado de Chuvieco, 2002, pag 274)

Por tanto, será necesario tener en cuenta este efecto, ya que la misma cubierta puede presentar valores de reflectividad muy distinta como consecuencia de los efectos del relieve. Una forma sencilla de reducir este efecto es mediante cociente entre bandas, ahora bien, puesto que el efecto atmosférico no es constante en las distintas longitudes de onda, no se elimina completamente.

Si se dispone de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) preciso y bien ajustado, puede realizarse una corrección más adecuada, modelando las condiciones de iluminación en el momento de adquirirse la imagen. Para eso, en primer lugar es necesario calcular el ángulo de incidencia (γ_i) de una vertiente, que depende de los ángulos solares y de pendiente:

$$\cos\gamma_i = \cos\theta_i \cos\theta_p + sen\theta_i sen\theta_p \cos(\phi_a - \phi_0) \quad (3)$$

Siendo: γ_i ángulo cenital del flujo incidente, θ_i ángulo cenital solar, θ_p el gradiente de la pendiente, ϕ_a el ángulo acimutal solar y ϕ_0 el ángulo de orientación de la pendiente. De manera que el cos γ_i nos sirve para valorar el efecto de iluminación en la vertiente, es equivalente al sombreado que recogen numerosos programas de SIG, y varía entre -1 y 1.

Una vez determinado el ángulo anterior pueden emplearse distintos métodos para compensar la diferencia de radiación incidente entre vertientes. Un primer método consiste en aplicar la siguiente ecuación:

$$\rho_{h,i} = \rho_i \left(\frac{\cos\theta_i}{\cos\gamma_i} \right) \quad (4)$$

Siendo $\rho_{h,i}$ es la reflectividad de un píxel i en terreno horizontal, ρ_i la misma en pendiente (la correspondiente a la imagen), θ_i el ángulo cenital solar de la escena y γ_i el ángulo de incidencia correspondiente a ese píxel. La fórmula anterior sobre-corrige la imagen, por lo que algunos autores proponen otro método para que pondera la imagen de iluminación en función de las condiciones promedio de iluminación de la imagen:

$$\rho_{h,i} = \rho_i + \rho_i \frac{\left(\cos\gamma_m - \cos\gamma_i\right)}{\cos\gamma_m} \quad (5)$$

Donde el subíndice m indica el valor promedio de la iluminación en la imagen de interés. Las dos fórmulas anteriores suponen que el efecto topográfico es constante para todas las bandas. Existen otros métodos semi-empíricos, que tienen en cuenta el carácter lambertiano en cada banda:

$$\rho h, i = \rho i \left(\frac{\cos\theta_i + c_k}{\cos\gamma_i + c_k} \right) \quad (6)$$

C_k es una constante empírica para cada banda k que se relaciona con la rugosidad promedio de la banda ($C_k=b_k/m_k$, donde b y m son los parámetros de la recta de regresión entre la imagen de reflectividad de la banda k y la imagen de iluminación).

Finalmente, otros métodos proponen fórmulas que consideran los efectos de irradiancia difusa, que puede ser importante en las vertientes situadas a umbría. Algunos autores han propuesto una variación de la fórmula para la radiancia incidente que considera los efectos de la pendiente:

$$E^*_{su,k} = E_{0,k} \cos\gamma_i \tau_{k,i} + E^*_{d,k} \quad (7)$$

$E^*_{su,k}$ y $E^*_{d,k}$ indican la radiancia que llega al suelo y la difusa, respectivamente, en un terreno montañoso. Si el ángulo de incidencia es > 90º, la vertiente está en sombra, llegando únicamente radiación difusa, que se calcula a partir de las condiciones atmosféricas en función del ángulo de incidencia, de la pendiente del terreno y de un coeficiente de anisotropía dependiente de la banda y de la fecha de observación. Este método no presentó buenos resultados en imágenes de invierno o topografía muy abrupta.

Efecto BRDF

Normalmente los modelos para el cálculo de reflectividad asumen que la superficie en cuestión presenta un comportamiento lambertiano, es decir, que la radiancia reflejada por dicha cubierta es igual en todas las direcciones. Sin embargo esta asunción dista bastante de ser correcta debido al efecto que los ángulos de observación y de iluminación tienen sobre la reflectividad detectada por el sensor (figura 3).

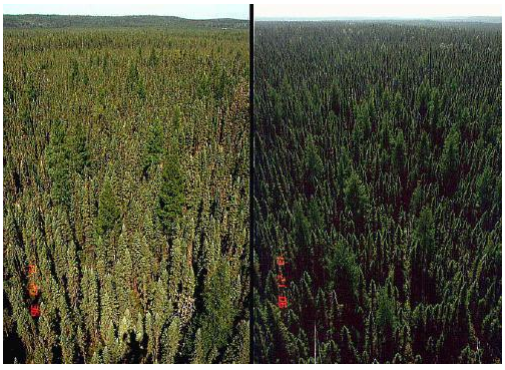


Figura 3. Efecto de los ángulos de observación en la reflectividad
Fuente: http://www-modis.bu.edu/brdf/brdfexpl.html)

Así, cuando las observaciones no se realizan con los mismos ángulos (solares y del sensor), como es el caso de sensores con capacidad de observación multiangular, o sensores con un ángulo de barrido muy amplio como el sensor AVHRR, no se puede asumir que la señal que miden sea comparable en el tiempo (aparte de las variaciones lógicas de las condiciones

atmosféricas y de iluminación). En el caso de sensores con muy alta resolución temporal como AVHRR, estos efectos se han paliado mediante métodos de composición que eligieran dentro de una serie de imágenes diarias, aquellos píxeles más cercanos a una visión vertical, aunque no se eliminan completamente, por lo que es necesario emplear algún método para corregir el efecto bidireccional.

Para realizar estas correcciones suelen emplearse las llamadas Funciones de Distribución de Reflectividad Bidireccional (BRDF), que describen los efectos direccionales de la reflectividad comparando la radiancia reflejada en una determinada dirección con la incidente en otra, mediante la siguiente función:

$$(8) \quad f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE(\theta_i, \phi_i, \lambda)}$$

Siendo DL la radiancia reflejada con un determinado ángulo cenital (θ_r) y acimutal (ϕ_r) y DE la irradiancia incidente con una determinada dirección cenital (θ_i) y acimutal (ϕ_i). Puesto que la función BRDF también depende la longitud de onda, siendo más severa para las longitudes de onda cortas, se ha incluido el parámetro λ.

En ocasiones se utiliza el factor de anisotropía, el cual relaciona la reflectividad de una cubierta en una dirección determinada con la que se obtendría para una dirección de referencia (normalmente para una observación vertical). Este factor viene dado por:

$$(9) \quad ANIF(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{R(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{R0(\theta_r, \phi_r, \lambda)}$$

Estos factores son de gran interés para conocer mejor el comportamiento direccional de una determinada cubierta, nos permitirían estandarizar las reflectividades observadas a una base común, siempre que se conozcan los ángulos solares y de situación del sensor.

Para poder introducir estas correcciones en las imágenes necesitamos información sobre el carácter iso o anisotrópico de las cubiertas, la cual no es fácilmente accesible, ya que hasta hace no mucho tiempo no existían sensores multiangulares como el MISR (tabla 6). Para el caso del sensor AVHRR se ha propuesto una corrección relativamente sencilla basada en modelo físco de transferencia radiativa (WAK). Este modelo permite estimar un factor de estandarización de la reflectividad, suponiendo una orientación de referencia (visión vertical y 45º de ángulo cenital solar). Se trata de encontrar un parámetro φ que permita convertir la reflectividad observada (ρ) a otra de referencia (ρ'):

$$(10) \quad \rho' = \rho\varphi$$

44.3. Correcciones atmosféricas

La influencia atmosférica no afecta por igual a los dos componentes de cálculo de la reflectividad: flujo descendente (denominador) y ascendente (numerador), ya que el espesor de la atmósfera que atraviesan es distinto. Además hay que considerar que a la irradiancia solar directa (medida en las tablas solares) hay que añadir la difusa, procedente de otros objetos vecinos. En definitiva, la radiancia que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo (que es la que pretendemos medir), sino que es fruto de los siguientes parámetros:

$$(11)\quad L_{sen,k} = L_{su,k}\tau_{k,0} + L_{a,k}$$

Donde $L_{su,k}$ es la radiancia que sale de la superficie; $\tau_{k,0}$, la transmisividad de la atmósfera para el flujo ascendente, y $L_{a,k}$ la radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

La transmisividad en la dirección ascendente depende del espesor óptico de ozono ($\tau_{oz,k}$), de aerosoles ($\tau_{a,k}$), del espesor óptico molecular ($\tau_{r,k}$) para esa misma banda, y del ángulo de observación (θ_0):

$$(12)\quad \tau_{k,0} = \exp((-\tau_{oz,k} - \tau_{a,k} - \tau_{r,k})/\cos\theta_0)$$

El ángulo de observación sólo debe considerarse cuando la adquisición no es vertical. Respecto al flujo incidente, hay que considerar que la irradiancia que llega al suelo ($E_{su,k}$) no es la que medimos en el techo de la atmósfera ($E_{0,k}$), sino que también está afectada por la atmósfera y por el componente de luz difusa:

$$(13)\quad E_{su,k} = E_{0,k}\cos\theta_i\tau_{k,i} + E_{d,k}$$

Donde $E_{o,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para la banda k), θ_i es el ángulo cenital del flujo incidente, formado por la vertical al terreno y los rayos solares, $\tau_{k,i}$ es la transmisividad atmosférica que afecta al rayo incidente, y $E_{d,k}$ es la irradiancia difusa, como consecuencia de la dispersión Rayleigh y Mie, que también depende de las condiciones de la atmósfera.

La transmisividad del rayo incidente tiene una expresión similar a la que afecta al flujo reflejado, cambiando el ángulo de observación por el de incidencia (θ_i):

$$(14)\quad \tau_{k,i} = \exp((-\tau_{oz,k} - \tau_{a,k} - \tau_{r,k})/\cos\theta_i)$$

En resumen, para conocer la reflectividad real de la cubierta, definida por:

$$(15)\quad \rho_k = \frac{D\pi L_{su,k}}{E_{su,k}}$$

es preciso resolver la siguiente fórmula:

$$(16)\ \rho_k = \frac{D\pi((L_{sen,k} - L_{a,k})/\tau_{k,0})}{E_{0,k}\cos\theta_i\tau_{k,i} + E_{d,k}}$$

En definitiva, para calcular la reflectividad de la superficie necesitamos estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente $\tau_{k,i}$ y ascendente $\tau_{k,0}$), la irradiancia difusa ($E_{d,k}$) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión ($L_{a,k}$).

Los procedimientos para abordar estas correcciones con exactitud son muy laboriosos y requieren datos sobre las condiciones de la atmósfera en el momento de tomar la imagen, que no suelen estar disponibles. Además, el efecto de la atmósfera no es constante en la imagen, sino que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua.
Hasta el momento, las correcciones atmosféricas se han abordado siguiendo cuatro procedimientos:

1. A partir de medidas *in situ*, ya sean referidas a perfiles de la composición atmosférica mediante radiosondeos, ya a estimaciones cualitativas del espesor óptico (midiendo, por ejemplo, la visibilidad) o mediante mediciones en terreno de la radiancia solar incidente o de la reflectividad en el terreno. Estos métodos resultan, en general, los más precisos, por cuanto facilitan una medición de las condiciones atmosféricas durante la toma de la imagen, pero rara vez están disponibles.
2. A partir de imágenes de otros sensores, que permitan estimar el estado de la atmósfera en el momento de la adquisición de las imágenes. Pese a la gran lógica de este planteamiento: dos sensores, uno mide los objetos de interés, y otro mide la atmósfera cuando se toman los datos, este enfoque resulta bastante novedoso, ya que sólo muy recientemente se han diseñado misiones con esta concepción. Por ejemplo, la Plataforma Terra, incluye sensores que miden específicamente el espesor atmosférico (el MISR), simultáneamente a otros orientados a medición de reflectividad o temperatura (como el MODIS). Si bien la resolución espacial de esos sensores no es la misma, la integración entre estos datos resulta muy beneficiosa para obtener productos calibrados de adecuada fiabilidad. No obstante, todavía hay pocas experiencias prácticas de este planteamiento.
3. A partir de modelos físicos de transferencia radiativa, que suelen basarse en una serie de atmósferas estándar. La exactitud de los modelos dependerá de la solidez las asunciones que se realicen y de la similitud entre los perfiles teóricos y las condiciones concretas de la atmósfera cuando se toma la imagen.

4. A partir de los datos de la propia imagen. Éste sería, sin duda, el método más operativo, pues no requeriría información externa y facilitaría una corrección completa de los datos.

Las últimas dos opciones resultan, por el momento, las más accesibles y por esta razón las analizaremos más en detalle.

En lo que se refiere al empleo de modelos de transferencia radiativa con atmósferas estándar, existen ya algunos programas bastantes operativos, que realizan la estimación del efecto atmosférico con bastante fidelidad, siempre y cuando se dé una buena similitud entre las condiciones atmosféricas de la imagen y las estándar incluidas en el modelo. Los modelos más conocidos son el 6S y el MODTRAN4. Ambos cuentan ya con numerosas versiones que van enriqueciendo las asunciones que inicialmente se plantearon en su diseño.

El 6S (segunda simulación de la señal de satélite del espectro solar) fue desarrollado inicialmente por el laboratorio de óptica atmosférica de la Universidad de Lille. En la última versión simula observaciones planas, considera la elevación, permite tener en cuenta el carácter no lambertiano de la superficie, e incluye nuevos gases (CH_4, N_2, O, CO) en el cálculo de la transmisión gaseosa. Facilita una estimación del efecto atmosférico para todo el espectro óptico, con bandas de hasta 0,025 μm de anchura.

Por su parte el MODTRAN4 es una nueva versión de un modelo desarrollado por la fuerza aérea norteamericana junto a una empresa privada (*Spectral Science, Inc*.). También considera los efectos de la reflectividad bidireccional (BRDF) en terreno y de la reflectividad de objetos cercanos (adyacencia).

Desde el punto de vista de su clara operatividad, también conviene destacar el modelo ATCOR, desarrollado por Richter, incluido entre los módulos del programa PCI-*Geomatics*. Este modelo basa la corrección en una serie de perfiles atmosféricos estándar, que se incluyen en el programa, aunque son fácilmente adaptables por el usuario en caso de que se cuente con información más detallada. Estas definiciones incluyen el contenido de vapor de agua y el tipo de aerosoles. El programa requiere únicamente una estimación del espesor atmosférico, indicando un rango de visibilidad (en Km.), y la altura promedio de la zona (aunque se puede incorporar un modelo digital del terreno, MDT). Incluye los coeficientes de calibración estándar para el SPOT-HRV y el Landsat-TM, pero el usuario puede incluir fácilmente los correspondientes a otros sensores. También se precisa introducir el ángulo cenital solar. El programa incluye opcionalmente una estimación de efecto de adyacencia, que es causada por la

dispersión procedente de cubiertas vecinas, a partir de considerar la diferencias entre la reflectividad del píxel y la correspondiente a los alrededores (en un área de 1 Km X 1 Km). El autor advierte que este modelo sólo funciona adecuadamente para sensores de observación casi vertical (se aceptan tolerancia de ±8º), en zonas por debajo de 1.500m de altitud y con pendientes moderadas.

Naturalmente, lo ideal sería poder derivar la corrección atmosférica de los datos de la propia imagen, si consiguiéramos encontrar alguna función que extrajera de la señal detectada por el sensor la parte correspondiente a las condiciones atmosféricas. Las alternativas para llevar a cabo esta tarea se pueden resumir en cuatro posibilidades: estimar la contribución de la atmósfera a partir de cubiertas que deberían presentar una reflectividad nula (métodos basados en el "objeto oscuro"); estimar el efecto atmosférico a partir de las diferencias de absorción y dispersión en distintas bandas del espectro para la misma imagen; realizar una homogeneización multitemporal entre imágenes (corrección relativa para que las imágenes sean comparables entre sí) y observar la misma zona con distintos ángulo.

La propuesta inicial de los métodos basados en el objeto oscuro (*dark object*) fue realizada por Chavez en 1975, con sucesivas mejoras en 1988 y 1996. El punto de partida del método consiste en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye al efecto de dispersión atmosférica. Asimismo, se observa que ese valor mínimo es mayor en las bandas más cortas, disminuyendo hacia el IRC y SWIR. Como comentado anteriormente, la dispersión de Rayleigh –la más común- afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas (fig.4), lo que confirma que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmósfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre.

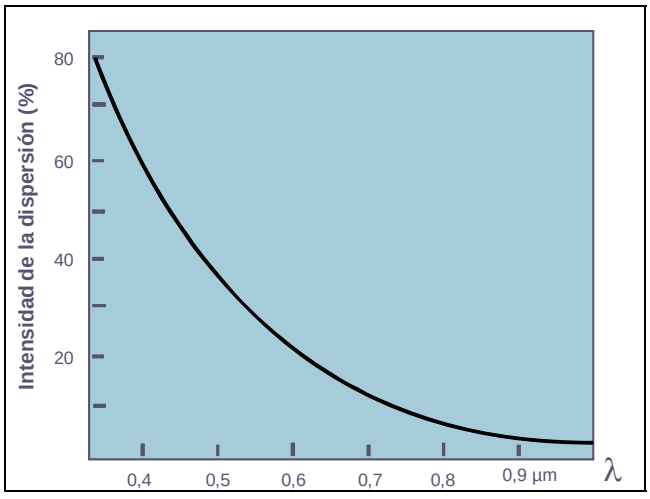


Figura 4. Intensidad de la dispersión de Rayleigh a distintas longitudes de onda (adaptado de Campbell, 1987).

En suma, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

$$ND'_{i,j,k} = ND_{i,j,k} - ND_{\min,k} \quad (17)$$

Donde $ND_{\min,k}$ indica el valor mínimo de cada banda. Esto, en definitiva, supone estimar el parámetro $L_{a,k}$ a partir del valor mínimo del histograma. La asunción puede ser bastante correcta siempre que tengamos en la imagen zonas en sombra o con agua profunda. Incluso se puede plantear establecer una red de superficies oscuras en la imagen y realizar luego una interpolación para tener mejor en cuenta la variedad espacial del espesor atmosférico.

El método del objeto oscuro resulta muy sencillo, y es valido para estimar el espesor atmosférico de aerosoles, pero los errores pueden ser notables para valores de reflectividad altos (por encima del 15%), al no considerar la transmisividad del flujo incidente y reflejado. Para evitar este problema se ha sugerido complementarlo con estimaciones en el terreno de la transmisividad o con parámetros climáticos auxiliares. De hecho, la última versión de la propuesta de Chavez sugiere estimar la transmisividad descendente a partir del espesor atmosférico definido por el coseno del ángulo cenital (θ_i) (Chavez, 1996). Además el autor sugiere de no considerar la irradiancia difusa. En resumen, para observaciones verticales, la formula quedaría como:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k)}}{E_{o,k}\cos\theta_i^2} \quad (18)$$

Donde $L_{a,k}$ se estimaría a partir el valor mínimo o de un objeto de reflectividad nula ($L_{a,k} = a_{o,k} + a_{1,k}ND_{\min}$). El autor asume que la transmisividad ascendente es 1, lo cual parece razonable para observaciones verticales.

Este modelo solo se ha demostrado eficaz para las bandas TM 1, 2, 3 y 4. La transmisividad descendente aumenta con la longitud de onda. El valor de transmisividad es independiente, según el modelo, de la longitud de onda, por lo tanto en principio se corrige poco la banda TM1 y mucho la banda TM4. Sin embargo, la corrección resulta satisfactoria y este error no es significativo. La transmisividad se hace prácticamente 1 para TM 5 y 7, con lo que en estas bandas la corrección del coseno no sería aplicable porque dichas bandas quedarían demasiado corregidas. Finalmente, el mismo autor propone también utilizar unos valores de transmisividad estándar, en lugar de la corrección del coseno. La fórmula propuesta, en este caso, quedaría finalmente como:

$$(19)\ \rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k)}}{E_{o,k}\cos\theta_i\ \tau_{k,i}}$$

Donde $\tau_{k,i}$ = 0,70 (TM1), 0,78 (TM2), 0,85 (TM3), 0,91 (TM4) y 1 para las bandas del SWIR (TM5 y TM7). Estos valores de $\tau_{k,i}$ son muy similares a los propuestos por otros autores.

44.4. Cálculo de reflectividades

La conversión de los ND almacenados en una imagen original a variables físicas es un paso previo muy útil para la interpretación de imágenes. Esta técnica permite trabajar con variables físicas de significado estándar (reflectividad), comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética. La obtención de esas variables requiere resolver satisfactoriamente la acción de varios factores. Algunos hacen referencia al propio sensor (calibrado de las radiancias), otras a las condiciones de observación (ángulos de iluminación y adquisición), y otras a elementos del ambiente (efecto atmosférico y topográfico, iluminación procedente de otras cubiertas).

La reflectividad se puede definir como la relación entre la energía reflejada y la incidente. Varía, por tanto, entre 0 (superficie perfectamente absorbente) y 1 (superficie perfectamente reflectora). La reflectividad de una cubierta depende de sus características físicas y químicas, así como de las condiciones de observación. Además no es constante, sino que se modifica en las distintas bandas del espectro, por lo que debemos añadirle el calificativo de espectral, acotando su medida a un determinado rango de longitudes de onda.

Como se puede deducir de su definición, para conocer la reflectividad de una superficie es preciso relacionar dos magnitudes: la energía reflejada y la incidente. La primera se puede obtener a partir de los datos medidos por el sensor. Esa medición se codifica a un valor numérico (ND), de acuerdo a unos coeficientes de calibración específicos para cada sensor. Ya que estos coeficientes son conocidos, puede realizarse el proceso inverso, obteniendo los valores de radiancia espectral detectada por el sensor a partir de los ND:

$$(20)\quad L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k} ND_k$$

Donde $L_{sen,k}$ corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda *k* (en $W*m^{-2}*sr^{-1}*\mu m^{-1}$); $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para esa banda, y ND_k

corresponde al nivel digital de los píxeles de la imagen en esta misma banda. Estos coeficientes de calibrado suelen incluirse en la cabecera de la imagen.

Por otro lado, la radiancia que llega al sensor –asumiendo que la superficie terrestre tiene un comportamiento lambertiano- es una función de la irradiancia solar, la reflectividad de la cubierta y las condiciones de adquisición (figura 1):

$$(21)\quad L_{sen,k} = \frac{E_{o,k} \cos\theta_i \rho^*_k}{D\pi}$$

Donde:

$E_{o,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esta banda del espectro) conocida a partir de las tablas solares;

ρ^*_k es la reflectividad aparente de la cubierta en esa banda *k*;

θ_i es el ángulo cenital del flujo incidente, formado por la vertical al terreno y los rayos solares.

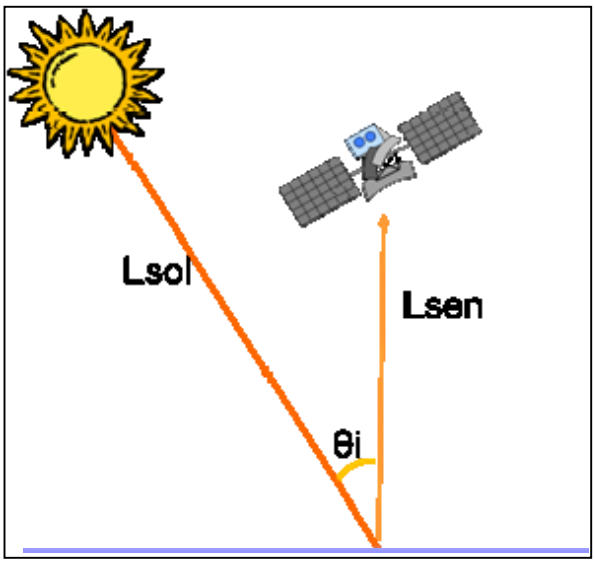


Figura 5. Cálculo simplificado de la reflectividad. Fuente: "Teledetección ambiental" de Emilio Chuvieco Salinero, pag. 265.

En modelos simplificados, como el que estamos ahora presentando, este ángulo se equipara al ángulo cenital solar (el complementario del ángulo de elevación solar, que se incluye en la cabecera de la imagen), lo que supone asumir que el terreno es llano. Finalmente, D es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol, calculado como:

$$(22)\quad D = (1 + 0{,}01674(sen(2\pi(J - 93{,}5)/365)))^2$$

Donde *J* indica el día en el calendario juliano y el seno se asume que toma los valores del ángulo en radianes. Este factor varía, aproximadamente, entre 0,983 en el perihelio y 1,017 en el afelio.

En definitiva, la *reflectividad aparente* puede calcularse a partir de una sencilla fórmula:

$$(23)\quad \rho^*_k = \frac{D\pi L_{sen}}{E_{0,k}\cos\theta_i}$$

Por tanto, el proceso de traducción de ND a reflectividades se realiza en dos fases:

1. conversión del ND a valores e radiancia ($L_{sen,k}$), a partir de los coeficientes de calibrado del sensor;
2. estimación de valores de reflectividad aparente (ρ^*_k), conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición (de la que se estima D y el ángulo cenital θ_i).

La transformación simple de ND a reflectividad únicamente modifica las diferencias de calibración entre bandas de la misma imagen y cambia la escala de medición a un parámetro físico, pero no permite corregir efectos atmosféricos, o aquellos debidos a la influencia de cubiertas vecinas, a los ángulos de observación o a las condiciones de iluminación. En definitiva, la reflectividad aparente asume que la observación se realiza en una atmósfera transparente, verticalmente, sobre suelo plano y superficies perfectamente lambertianas. Sin embargo, los componentes de la atmósfera producen un efecto de absorción y dispersión, que modifican, a veces notablemente, la señal procedente de la cubierta. Además, este efecto es dependiente de la longitud de onda –afectando especialmente a las más cortas-, por lo que no es aconsejado prescindir de el, ni siquiera para realizar transformaciones entre bandas. También dependiente de la atmósfera es el denominado efecto de adyacencia, que implica que se reciba energía procedente de cubiertas vecinas. Este efecto reduce el contraste de la escena y puede dificultar la discriminación entre objetos vecinos. Por otra parte, la observación vertical puede asumirse para buena parte de los sensores de interés ambiental (Landsat-MSS, TM, ETM+, IRS-LISS, etc.), pero no siempre para otros que poseen la capacidad de observar áreas oblicuamente, de cara a mejorar su cobertura temporal o plantear modelos estereoscópicos, como ocurre con el SPOT-HRV, o con el NOAA-AVHRR, con un ángulo de barrido muy amplio. En tercer lugar, el terreno plano sólo es asumible cuando las pendientes sean realmente bajas (<5º) y no existan variaciones de iluminación por efecto de la vertiente. Finalmente, el carácter lambertiano de las cubiertas es tanto menos nítido cuanto menos rugosas sean. En las siguientes secciones se trataran estas correcciones.

44.5. Radiometria de campo y laboratorio: técnicas, instrumentos y aplicaciones

Por espectroradiometría (también espectroscopia) se entiende el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Esta interacción es específica para cada tipo de superficie y depende de sus características químico-físicas.

Las aplicaciones más comunes de la espectroradiometría son:

- Identificar de longitudes de onda apropiadas para estudiar un determinado fenómeno y analizar como este influye en la reflectividad.
- Ensayar metodologías y técnicas para su posterior aplicación al análisis de imágenes de satélite.
- Calibrar/validar los datos obtenidos desde plataformas aéreas y satelitales.
- Calibrar/validar los modelos de transferencia radiativa, que combinan los parámetros biofísicos con las variaciones en la reflectividad.

Los instrumentos utilizados en espectroradiometría se denominan:

- Radiómetros: los que poseen un número limitado de bandas (multiespectrales) (fig. 6 B);
- Espectroradiómetros: los que miden el espectro continuo (hiperespectrales) (fig. 6 A).
- Y ambos pueden ser de:
- Haz único: si un mismo sensor mide el panel de referencia y luego el objeto que nos interesa medir (fig. 6 A);
- Haz doble: si dispone de dos sensores distintos para que midan simultáneamente la irradiancia solar y la radiancia de la muestra (fig. 6 B). La simultaneidad de la medición garantiza mayor exactitud.

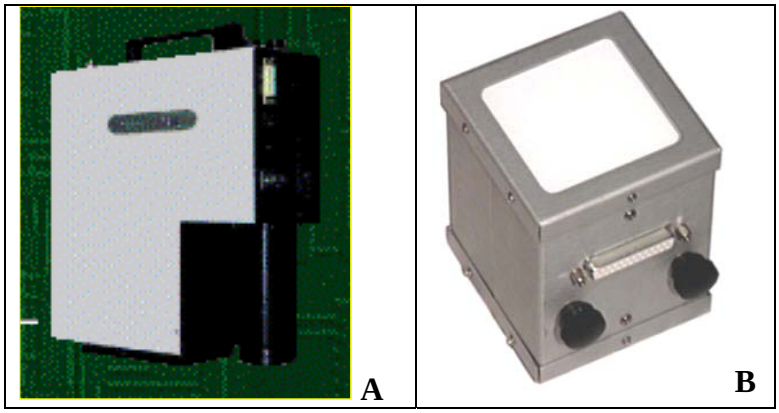


Figura 6. Ejemplos de: A) espectro radiómetro de haz único (GER 2600) y B) radiómetro de doble haz (CROPSCAN MSR),

A modo de ejemplo, analizaremos más en detalle las características y el funcionamiento del GER 2600 y del CROPSCAN MSR.

El espectroradiómetro GER 2600 tiene 704 bandas que van desde el ultravioleta (350nm) hasta el infrarrojo medio (2500nm). La anchura de bandas es de:

- 1.5nm (aprox.) en el rango 350-1050nm,
- 6.5nm entre 1050 y1900nm,
- y 9.5 nm entre 1900 y 2500nm.

La radiancia recibida por el sensor se parte en estas anchuras de banda gracias a tres rejillas fijas construidas con Si (una rejilla en el VIS) y PbS (una para el IRC-SWIR1 y otra para el SWIR2). Es un espectro-radiómetro de gama media-alta por sus buenas prestaciones en cuanto a resolución espectral y radiométrica, repetitividad de mediciones, calibración interna y de longitud de onda.

Tratándose de un espectroradiómetro de haz único, para poder medir la reflectividad de una muestra hay que proceder de la siguiente manera:

1. Medir la radiancia de una superficie de referencia. Generalmente se utilizan paneles blancos calibrados (Labsphere Spectralon TM , Labsphere, Inc. North Sutton, New Hampshire) compuestos de un material (spectralon) que refleja más del 99% de la radiación que recibe.
2. Retirar el panel de referencia y colocar la muestra conservando la geometría del experimento (orientación y distancias entre radiómetro, fuente de iluminación y muestra), tratando de que pase el menor tiempo posible para que no varíen las condiciones de iluminación (sobre todo en el caso de mediciones en campo).
3. Medir la radiancia de la muestra.

De este modo, el programa asociado al radiómetro calculará la reflectividad de la muestra sustrayendo la corriente de fondo del instrumento (ruido) y calculando el ratio entre la radiancia de la muestra y la radiancia del blanco (según la definición estándar de la reflectividad).

La porción de la muestra que mide el instrumento, denominado campo de vista (FOV) depende de la abertura del objetivo y de la distancia entre instrumento y muestra. Solitamente se trata de un área de forma elíptica, fácilmente calculable. Para asegurarse la fiabilidad de la medición es necesario que la muestra sea por lo menos el doble de grande que el FOV del instrumento.

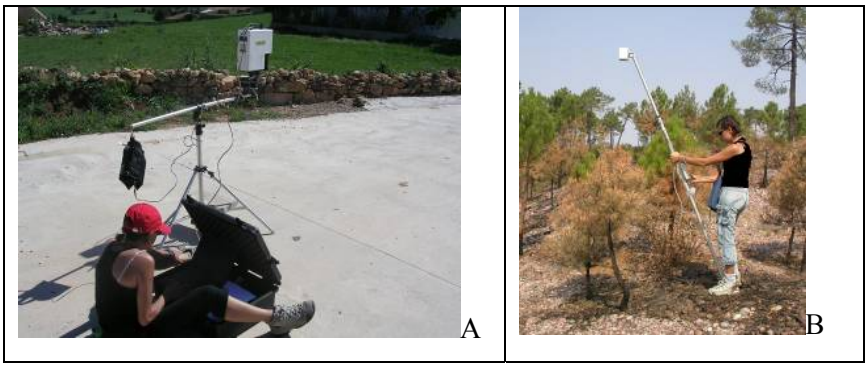


Figura 7. Ejemplos de mediciones con: A) espectro radiómetro de haz único (GER 2600) y B) radiómetro de doble haz (CROPSCAN MSR).

El radiómetro de doble haz CROPSCAN MSR, se compone de hasta 16 bandas discretas (parecida a las de los satélites más comunes), entre 450-1750 nm. Este radiómetro tiene dos grandes ventajas:

1. Es muy ligero y se puede fácilmente utilizar en campo.
2. Siendo de doble haz, da como resultado directamente mediciones de reflectividad. Cuando se realiza una medición, el instrumento mide al mismo tiempo la radiancia solar incidente (en la parte superior de la cabeza del radiómetro) y la radiancia de la muestra (en la parte inferior). De este modo no se necesita utilizar paneles de referencia.

La espectroradiometría se aplica principalmente en laboratorio y en campo.

La espectroradiometría de laboratorio tiene como principal objetivo el de realizar mediciones en "condiciones controladas" para poder identificar las modificaciones que sufre la firma espectral de la muestra sólo por intervención del fenómeno en examen. Para que las mediciones sean fiables y las "condiciones controladas" hay que tener en cuenta distintos factores (figura 8), que se describen a continuación

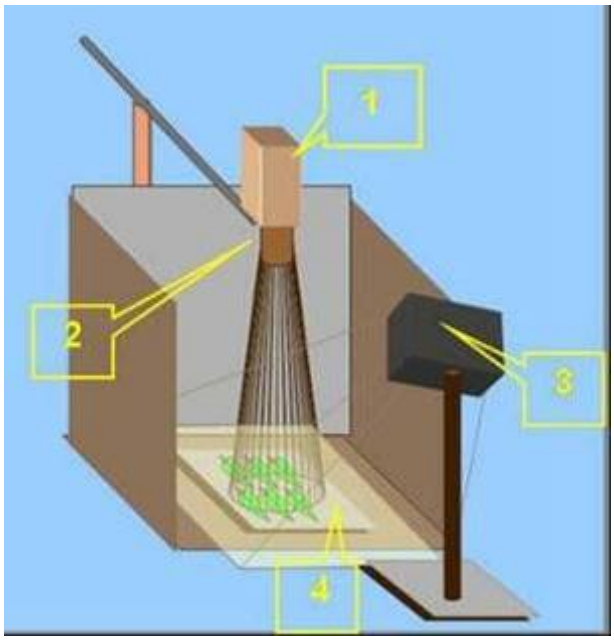


Figura 8. Ejemplo de medición realizada en laboratorio y factores que hay que controlar para obtener resultados fiables.

1-<u>El aparato de medición</u>. Es necesario comprobar:

- El tiempo de encendido del radiómetro, puede alterar la precisión de la medición.
- Linealidad de la respuesta espectral, respecto a un blanco de referencia (Spectralon).
- Exactitud de la longitud de onda.
- Campo de visión (FOV).
- Geometría del montaje.
- Tolerancia de temperatura y humedad ambiental. La mayoría de los radiómetros no son operativos a temperaturas superiores a 40º-45º C, con lo que hay que procurar mantener el instrumento a menor temperatura utilizando todo tipo de protecciones y aislantes (figura 9).

Figura 9. Ejemplo de protección aislante para el GER 2600.

2-<u>Control de la reflectividad de fondo y difusa</u>: para obtener la señal de un objetivo concreto, es necesario evitar interferencias de reflectividad de otros objetos próximos. Para ello, es necesario

contar con superficies que absorban la máxima radiancia posible en todo el rango de longitudes de onda investigado.

3- Las fuentes de iluminación. Con fuente de iluminación artificial hay que:

- comprobar las variaciones de reflectividad en un mismo objetivo en función del tiempo de encendido de la lámpara.
- considerar de utilizar lámparas de cuarzo halógeno de 500 W, debido a las distorsiones presentes en las lámparas con filamento de tungsteno incandescente y de corriente alternada.
- comprobar la geometría del montaje.

4- La muestra. La muestra tiene que entre en el FOV del instrumento de medida y tiene que ser colocada sobre una bandeja o fondo con reflectividad conocida.

Un ejemplo de aplicación es el análisis de la variación de la firma espectral de hoja de rebollo (*Quercus pyrenaica*) a medida de que se van secando artificialmente en una estufa de laboratorio. En la figura 10 se muestran: un ejemplo de la muestra (hojas de rebollo posicionadas en una bandeja de medición, A) y los espectros medidos correspondientes a distintos contenidos de humedad, expresada en términos de FMC (*Fuel moisture content,* B).

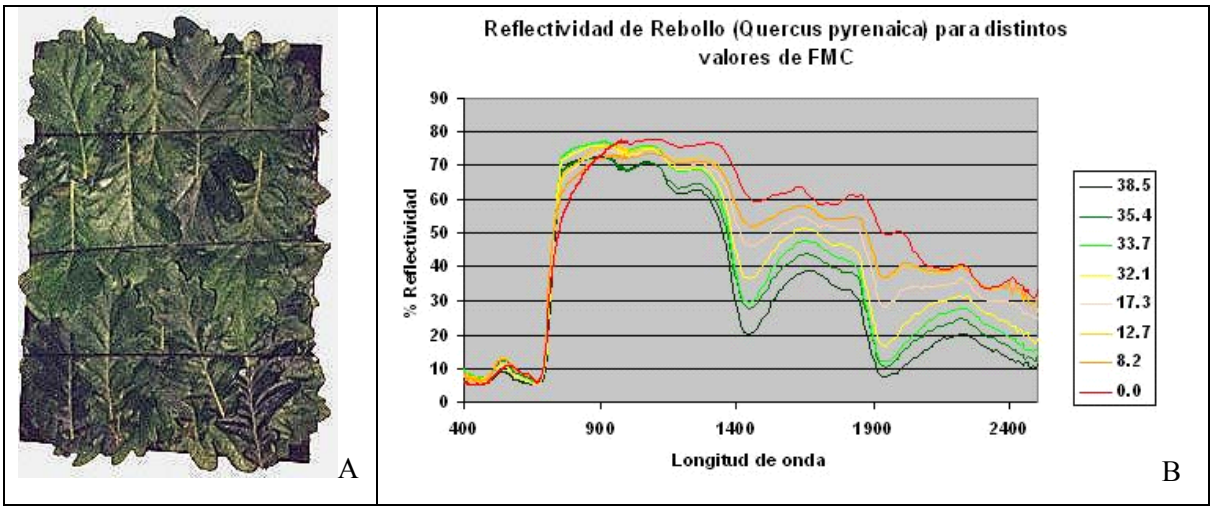


Figura 10. Ejemplo de aplicación de la radiometría de laboratorio a la estimación del estado hídrico de las hojas de rebollo. A) Bandeja de medición, B) firmas espectrales correspondientes a distintos niveles de hidratación.

La espectroradiometría de campo tiene como objetivos específicos:

- La recopilación de datos para la corrección atmosférica de las imágenes obtenidas con sensores aeroportados y de satélite.
- La obtención de firmas espectrales de referencia (librerías espectrales).
- El análisis a escala más reducida y controlada de fenómenos de interés.

- La calibración/validación de datos obtenidos con otros sensores.

En este caso, la fuente de iluminación utilizada es el sol. Las condiciones óptimas para realizar las mediciones, entonces, se dan en días despejados y cuando la altura del sol es máxima (entre las 12 y las 14 horas solares). Además, para asegurar la suficiente iluminación, dependiendo del tipo de muestra analizada, las mediciones se realizan entre abril y principios de septiembre.

Los principios básicos que hay que tener en cuenta a la hora de realizar una medición son parecidos a los descritos para el laboratorio, sólo que en este caso hay muchas más variables que pueden influir en el resultado final.

La geometría del montaje tiene que mantenerse fija a lo largo de toda la experimentación y hay que elegir el soporte adecuado dependiendo del tamaño de la muestra (figura 11 A, B, C).

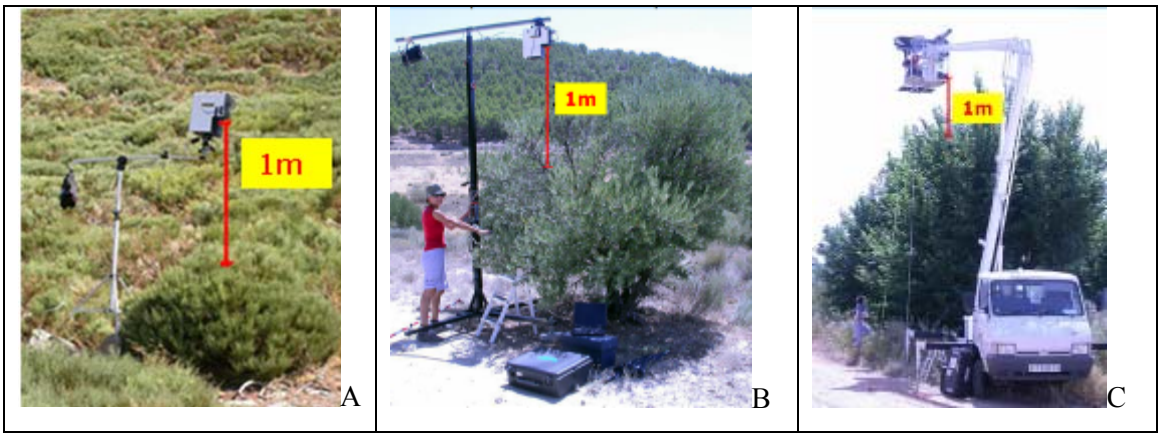


Figura 11. Ejemplo de soporte para mediciones con radiómetro: A)trípode, para muestras hasta 1 m de altura, B) torre elevadora, para muestras hasta 5 m, C) grúa con brazo elevador, para muestras hasta 10 m.

Bibliografía

[1] Chuvieco Salinero, E. (2002). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Ariel Ciencia*. Pag 259-273.

[2] Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62, 1025−1036.

Tema 45. Corrección geométrica de imágenes de satélite: modelo polinomial, modelo paramétrico, “Rational Polinomial Coefficients”. Remuestreo. Ajuste en bloque de imágenes de satélite. Aplicaciones topográficas. Equilibrado radiométrico y mosaico. Obtención de MDE por correlación automática de imágenes. Sensores de alta resolución para cartografía. Cartografía de imagen: ortoimágenes. Actualización de cartografía.

45.1. Corrección geométrica de imágenes de satélite

Es evidente que la utilización de las imágenes de Teledetección, tanto de satélite como aéreas, requiere de su **georreferenciación**; es decir: relacionar geométricamente cada píxel de la imagen con el punto de superficie terrestre a que corresponde. La **Corrección Geométrica** de una imagen consiste en la **creación de una nueva imagen** que conserve los valores radiométricos de la original, pero habiéndole aplicado una **transformación geométrica** para adaptarla a una Proyección Cartográfica y un Sistema Geodésico determinados.

Las imágenes procedentes de sensores de barrido tienen una geometría que podemos llamar "espacio-temporal": la geometría de la imagen no se puede estudiar por puras consideraciones de geometría interna del sensor, sino que hay que tener en cuenta todos los movimientos que han realizado el elemento móvil del sensor y el satélite, durante el tiempo de la toma. Este proceso de formación es lo que hace que la geometría de las imágenes procedentes de sensores de barrido sea más complicada “a priori” que la de las imágenes instantáneas.

Para corregir geométricamente una imagen, es necesario:
1º) Determinar el “**modelo geométrico**” de la deformación de la imagen :
Es decir, el establecer las relaciones matemáticas que ligan las coordenadas de un punto en la imagen (línea, columna), con las coordenadas terrestres (latitud, longitud y altitud) del punto correspondiente.
2º) Aplicar un **"remuestreo"** a la imagen (Figura 1): “creación" de la imagen corregida, lo cual supone realizar una “interpolación radiométrica” para determinar el valor numérico a asignar a cada píxel de la nueva imagen.

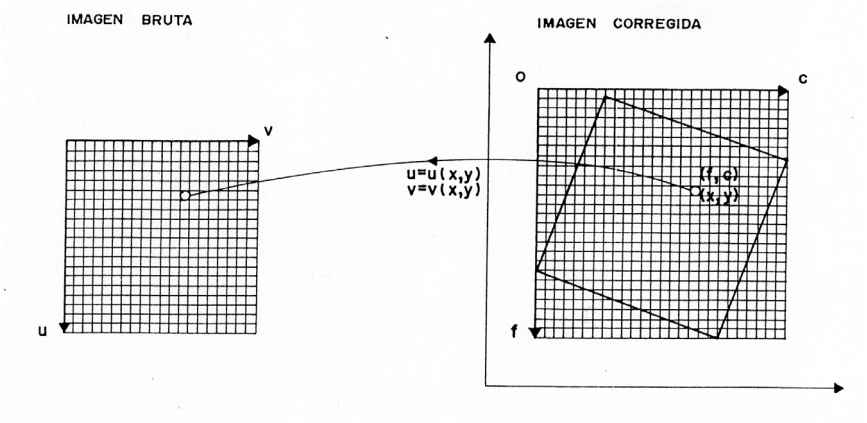


Figura 1.

45.1.1. Modelo polinomial

El proceso que podríamos llamar "**clásico**" de corrección de imágenes de satélite (ya superado técnicamente) utiliza un modelo geométrico polinomial. En la figura 2 se puede ver un esquema de dicho proceso clásico, que se realiza en dos fases:

- **Precorrección aproximada**
- **Refinamiento** de la corrección mediante un ajuste polinomial

que explicamos a continuación:

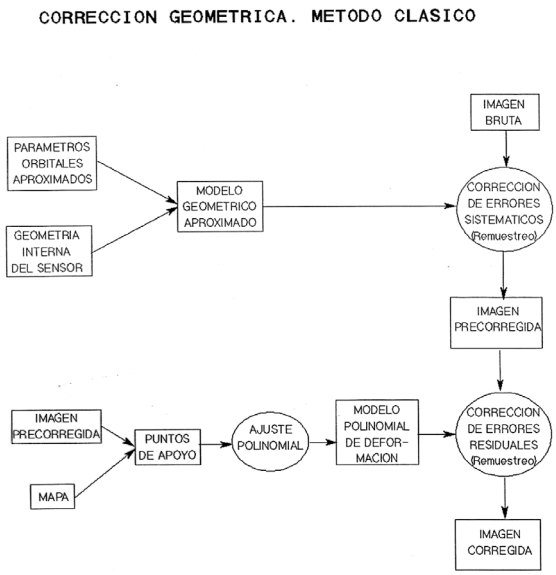


Figura 2. Proceso clásico de corrección geométrica

Primera fase: Precorrección aproximada

Se aplica una transformación para corregir los efectos geométricos sistemáticos presentes en la imagen. Dicha transformación la realiza automáticamente la Estación de Recepción y Proceso de Datos del satélite en cuestión, no el usuario final.

Como vimos antes, la geometría de las imágenes obtenidas por los sensores de barrido se ve influida por los movimientos que realiza el satélite durante el tiempo de toma de la imagen. De un modo un intuitivo, se puede considerar que cada uno de estos movimientos "introduce una deformación" en la imagen; deformación que en esta fase determinamos y corregimos.

En la figura 3 se encuentra un resumen de todas las deformaciones corregidas en las escenas del sensor MSS de los satélites Landsat en el centro de Recepción de imágenes. Las imágenes con esta precorrección ya realizada se suelen llamar imágenes de “Nivel de tratamiento 1B". Los usuarios que van a aplicar este método clásico de corrección (cada vez menos empleado) deben comprar este tipo de imágenes.

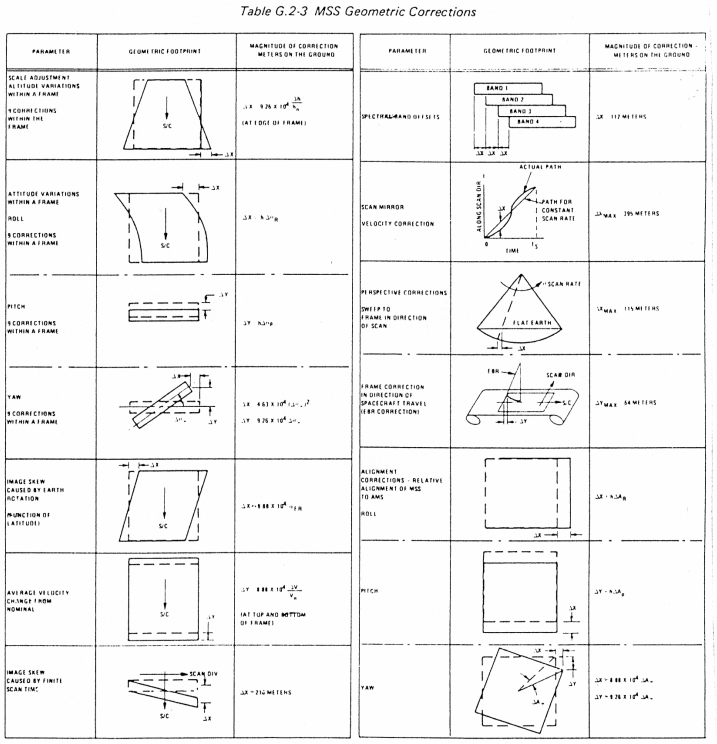


Figura 3.

Naturalmente, para aplicar las correcciones adecuadas necesitamos conocer el sentido y la magnitud de todos estos movimientos, lo cual quiere decir que tenemos que conocer los parámetros orbitales (posición y actitud) del satélite en todos los instantes de la toma de la imagen. Para ello, disponemos de dos tipos de información:

- Los **parámetros orbitales nominales** son los que está previsto "a priori" que siga el satélite, y a los que se intenta ajustar en el Centro de Control de Vuelo. Naturalmente, los errores en la órbita y actitud realmente conseguidas pueden ser importantes.
- Los parámetros orbitales **de telemedida** son los calculados "a posteriori" por el Centro de Control, a partir de datos de **GPS**, **IMU** Inertial Measurement Unit) y sensores de estrellas "**star trackers**" que se encuentran a bordo del satélite. Se aproximan más a los parámetros reales, pero no son exactos. Si lo fueran, al menos con una precisión suficiente, estaría totalmente resuelto el problema de las correcciones geométricas, y sería innecesario el ajuste polinomial.

Segunda fase: Ajuste Polinomial

El ajuste polinomial persigue corregir las "deformaciones" debidas a la imprecisión en el conocimiento de los parámetros orbitales, mediante funciones de interpolación, que suelen ser polinomios. Consiste en "obligar" a nuestra imagen a **coincidir** con la referencia en una serie de puntos prefijados (**puntos de control**), "acomodándose" el resto de la imagen a esta deformación impuesta. Matemáticamente, se trata de un problema de Cálculo Numérico del tipo de "**interpolación**". El modelo polinomial se basa en suponer que entre las coordenadas **columna** (u) y **fila** (v) de cada píxel en la imagen antes de la corrección, y las coordenadas (x, y) de ese mismo punto en una **proyección cartográfica** determinada, existen las siguientes relaciones (empleando polinomios de 2º grado, que son los más habituales):

$$\mathbf{u = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x.y + a_4.x^2 + a_5.y^2}$$
$$\mathbf{v = b_0 + b_1.x + b_2.y + b_3.x.y + b_4.x^2 + b_5.y^2}$$

En contra de lo que parecería lógico, la transformación que se suele utilizar es la que pasa de coordenadas terreno (x, y) a coordenadas en la imagen bruta (u, v), y no la inversa. Esto es debido al proceso informático de creación del fichero de la imagen corregida: hay que ir "rellenando" los valores de los píxeles uno a uno, con los valores numéricos que encontramos en la imagen bruta, en la posición homóloga. Este proceso queda ilustrado en la figura 1. Como vemos, se utilizan **dos polinomios**: uno que relaciona (x,y) con **u**, y otro que relaciona (x,y) con la **v**. Los elementos (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) son los llamados "**coeficientes**" de los polinomios, es decir números reales **constantes**. Es necesario determinar sus valores **para**

cada imagen a corregir. Se pueden emplear polinomios de grado 1, 2, 3, o superior, aunque el uso de grados mayores a 2 es **poco recomendable**, como luego veremos.

Puntos de control geométrico

Para averiguar cuáles son los valores de todos esos coeficientes, se utilizan los llamados "puntos de control geométrico" (también llamados "puntos de apoyo"). Se trata de un cierto número de puntos de los cuales conocemos sus coordenadas tanto en la imagen como en una referencia geométrica. (figura 4).

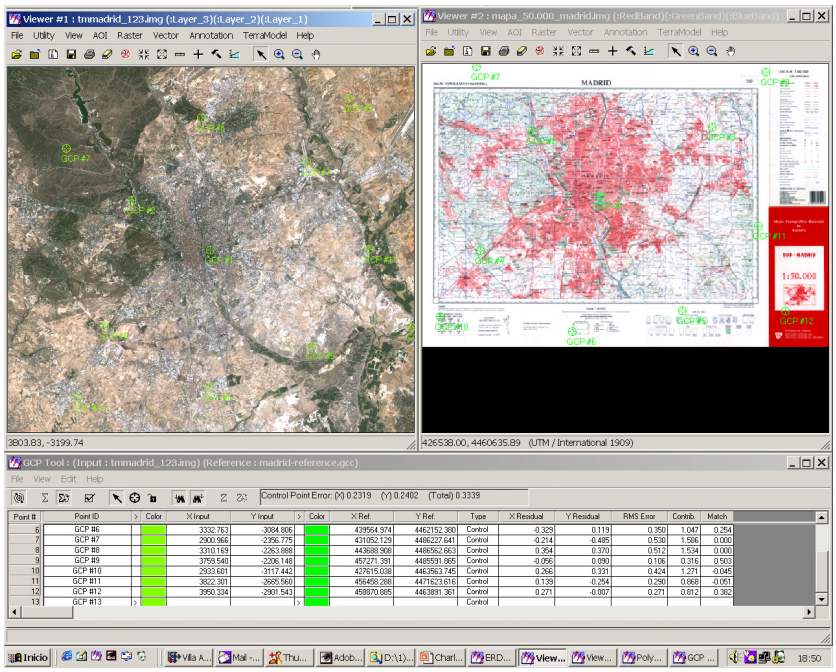


Figura 4. Proceso de medida de puntos de control

La referencia geométrica tradicional era un mapa, pero **últimamente se suelen utilizar ortofotos digitales**, ya que con un mapa es muy difícil estar seguros de que el elemento que estamos identificando en la imagen es exactamente el mismo que aparece representado en el mapa. Además, los elementos de los mapas de escalas medias y pequeñas han sufrido en muchos casos **desplazamientos** y **generalizaciones** que hacen que puedan inducir a errores graves en la medida de coordenadas. Los puntos de control deben ser puntos bien definidos, como intersecciones de carreteras, etc. El trabajo de identificación y medida de los puntos de control es monótono y delicado, por lo que se intenta **reducirlo** lo más posible, con técnicas como la modelización paramétrica ó la "triangulación espacial". El **mínimo número de puntos de control** es igual al número de coeficientes a determinar en cada uno de los polinomios. (Ej.: los polinomios de grado 2, que tienen 6 coeficientes cada uno requieren 6 puntos de control).

Pero hay que disponer de un número sobreabundante de ecuaciones para poder detectar los **puntos equivocados**, y para promediar los errores aleatorios. Normalmente se utilizan 3 ó 4 veces más puntos de los imprescindibles, es decir de 18 a 24 para polinomios de segundo grado.

Una vez localizados los Puntos de Control suficientes, el **cálculo de los coeficientes** se realiza simplemente sustituyendo los valores medidos de (u, v, x, y) para cada uno de ellos en las dos ecuaciones anteriores. Cada punto proporciona así una ecuación para el polinomio A, y otra para el B.

En cuanto a la **distribución**, los puntos deben cubrir toda la imagen, y estar regularmente distribuidos para no "sesgar" el ajuste del polinomio hacia una zona. Hay que prestar especial atención a los bordes, para evitar una excesiva extrapolación, y además porque es la zona donde se suelen producir las uniones en los posibles "mosaicos" con otras imágenes. Por otra parte, no es conveniente situar puntos de control en zonas muy elevadas respecto a la altitud media de la zona de la imagen, como puertos, cumbres de montañas, etc. Esto es debido a que, al no tener en cuenta este método las diferencias de altitud, estos puntos "extremos" introducen unas "tensiones" en el polinomio que afectan negativamente a su precisión en la generalidad de la imagen. Más adelante veremos otros métodos que no tienen este inconveniente.

Depuración de los puntos de Control

Una vez calculados los coeficientes de los polinomios de mejor ajuste, se procede a aplicarlos a los mismos puntos de control, obteniendo así los llamados "**residuos**", que son las diferencias entre los valores calculados mediante los polinomios y los observados en la fase de toma de puntos de control. Cada punto de control tiene así una primera medida de "calidad", ya que en general los residuos muy grandes corresponden a puntos mal medidos ó identificados. Se procede por tanto a eliminar secuencialmente de la lista de puntos de control a los que dan mayores residuos, siempre con mucho cuidado: en efecto, un punto puede ser bueno y tener un residuo muy alto por tener cerca otro muy malo. Es conveniente, por tanto, no eliminar los puntos totalmente, sino ponerlos como "check point" (puntos que no intervienen en el cálculo, pero de los cuales se calcula el residuo), para poder probar a reintroducirlos posteriormente. Asimismo, un punto puede ser malo y tener residuo bajo. Contra esto no podemos hacer nada, pero influirá poco en el cálculo. Por otra parte, es importantísimo no dejar "calvas" (zonas grandes sin ningún punto de control) debido a la eliminación de puntos, ya que en esas zonas el polinomio quedaría libre y por tanto, muy deformado con respecto al terreno. Al mismo tiempo que los residuos de cada punto, es conveniente calcular el "**error medio cuadrático**" de todos

los puntos. En general, se debe buscar que el error medio cuadrático global sea del orden de **1 píxel**.

Cálculo de los valores de los coeficientes

Se obtiene por tanto **un sistema con más ecuaciones que incógnitas**, que se ajusta por el método habitual de "**mínimos cuadrados**"; es decir, se eligen aquellos coeficientes que hacen mínima la suma de los "residuos", o diferencias entre las coordenadas (u, v) medidas, y las calculadas por las fórmulas. Todos los paquetes de programas de Teledetección tienen funciones que calculan automáticamente estos coeficientes, una vez que hemos introducido las coordenadas de todos los Puntos de Control, sin que el usuario tenga que lidiar con la resolución del sistema de ecuaciones.

Grado de los polinomios

Antes dijimos que no era conveniente utilizar grados muy elevados (mayores de 2, en general). Esto es debido al comportamiento "caprichoso" de los polinomios de grados elevados (figura 5) debido a su excesiva "flexibilidad" cuando la densidad del "soporte" de puntos no es muy grande:

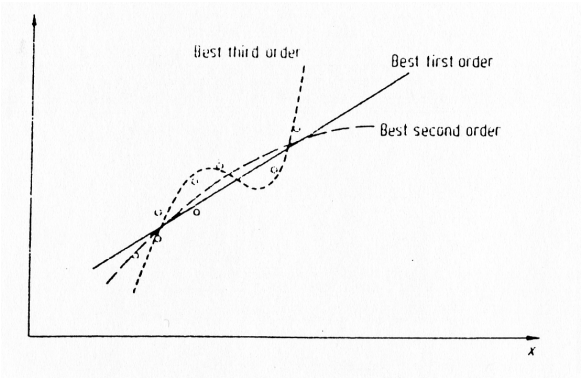


Figura 5.

El **grado 2** es el más comúnmente utilizado para corregir imágenes de satélite.

45.1.2. Remuestreo de la imagen

Consiste en la creación del fichero de la imagen corregida. Es un problema matemáticamente trivial, una vez que se dispone del "modelo de deformación", es decir, de los coeficientes de los polinomios que permiten realizar la transformación de coordenadas. En este proceso se puede **elegir el tamaño del píxel** de la imagen de salida, que conviene que sea igual o ligeramente

inferior a la de entrada, pero es muy importante que sea un **número "redondo**" para evitar problemas de redondeo posteriores. Por ejemplo es muy conveniente usar múltiplos o submúltiplos de 100, como: 100, 50, 25, 12.5, 10, 5, 2.5, 1, 0.5 metros. Al fijar el origen del fichero de la imagen, se debe aprovechar también para hacer que las coordenadas de la esquina superior izquierda sean **múltiplos del tamaño de píxel**. Esto es muy importante para permitir el mosaicado posterior de las distintas imágenes, ya que asegura que sus píxeles estén "**alineados**".

Interpolación radiométrica:

Al transformar las coordenadas cartográficas (x, y) de un píxel en la imagen corregida, a las fila, columna (u, v) en la imagen bruta, el resultado que obtenemos no es, en general, un número entero. Es decir, que el punto homólogo del píxel que queremos "rellenar" en la imagen corregida no es el centro de un píxel en la imagen bruta. ¿Qué valor radiométrico le asignamos entonces? Hay varios métodos, que se representan en la figura 6:

- Método del vecino más próximo ("nearest neighbor"): es la solución más inmediata, asignarle el valor del píxel cuyo centro quede más próximo al punto transformado. Puede ser aceptable en ciertos casos, y es lo más rápido de realizar, pero hay otros métodos de asignación del valor radiométrico que dan mejores resultados visualmente. Si la imagen se va a someter a una clasificación automática posterior, algunos autores recomiendan utilizar este método del vecino más próximo, a fin de dejar inalterados los valores radiométricos obtenidos por el sensor (que se supone que son los de la imagen bruta, aunque esto es discutible).

- Interpolación bilineal: Consiste en realizar 3 interpolaciones lineales sucesivas entre los valores de los 4 píxeles cuyos centros rodean a nuestro punto. Da unos resultados mejores que el método anterior, a costa de un mayor tiempo de cálculo. (Téngase en cuenta que estas operaciones hay que realizarlas para cada píxel de la imagen).

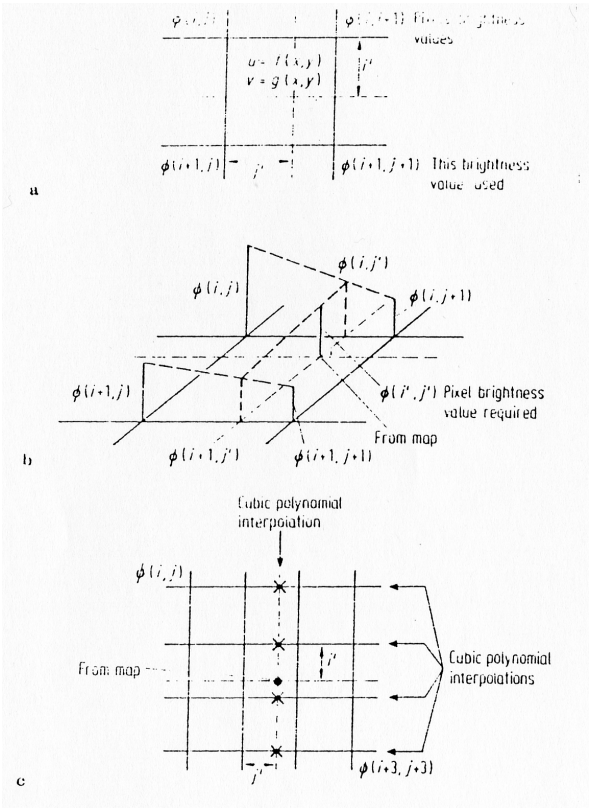


Figura 6.

- Interpolación bicúbica: Se utilizan los valores del entorno de los 4x4 píxeles más próximos. Se interpola "horizontalmente" en cada una de las 4 líneas con el polinomio de tercer grado que pasa por los 4 puntos conocidos, y luego se interpola "verticalmente" con el polinomio de tercer grado que pasa por esos 4 puntos calculados. La fórmula, una vez simplificada, resulta ser una combinación lineal entre los 16 valores del entorno, cuyos coeficientes se calculan según las distancias en vertical y en horizontal a los bordes de la cuadrícula. La **calidad visual** obtenida es muy buena, y el algoritmo es fácilmente implementable, por lo que éste es el método de interpolación **más utilizado**.

45.1.3. Modelo paramétrico

Como dijimos anteriormente, un **modelo geométrico** de una imagen es la descripción de las relaciones que ligan la posición de un punto sobre el terreno, con su imagen captada por el sensor. En las **imágenes instantáneas**, como son las fotografías aéreas, 6 parámetros bastan para modelizar la geometría, y existen desde hace mucho tiempo formulaciones rigurosas del problema. Para las **imágenes no instantáneas**, tomadas con escáneres de barrido, la complejidad del proceso de toma llevó al principio a contentarse con una modelización geométrica empírica, de tipo polinomial. Pero con la aparición de sensores de alta resolución, la

precisión de este método resulta insuficiente. Esto llevó en su día a plantearse la realización de una modelización "física", es decir, el ser capaces de relacionar realmente cada punto de la imagen con una posición del rayo perspectivo a que corresponde. Una de las ventajas de esta modelización es una disminución drástica del número de puntos de control necesarios. Además, el **modelo paramétrico** (también llamado "**modelo físico**") es imprescindible para poder corregir los efectos del relieve, y también para la restitución fotogramétrica de un par estereoscópico de imágenes. En la figura 7 se encuentra un esquema del proceso global de corrección de una imagen por modelización paramétrica de su geometría:

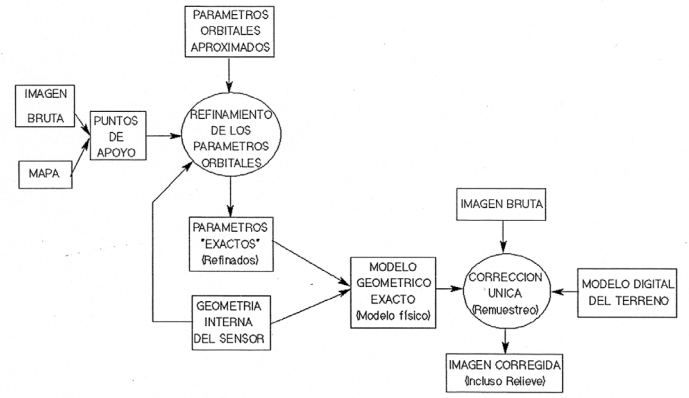


Figura 7.

En fotogrametría se estudia que para una **imagen instantánea** (figura 8), la relación entre coordenadas imagen (x,y) y coordenadas terreno (X, Y, Z) se pueden expresar según las llamadas "**Ecuaciones de colinearidad**":

$$x = x_o - f\frac{m_{11}(X-X_L)+m_{12}(Y-Y_L)+m_{13}(Z-Z_L)}{m_{31}(X-X_L)+m_{32}(Y-Y_L)+m_{33}(Z-Z_L)}$$

$$y = y_o - f\frac{m_{21}(X-X_L)+m_{22}(Y-Y_L)+m_{23}(Z-Z_L)}{m_{31}(X-X_L)+m_{32}(Y-Y_L)+m_{33}(Z-Z_L)}$$

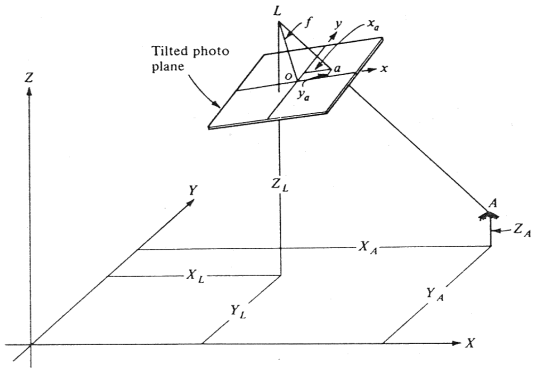


Figura 8.

Donde m_{ij} son los elementos de la matriz de rotación:

$m_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$

$m_{12} = \text{sen } \omega \text{ sen } \varphi \cos \kappa + \cos \omega \text{ sen } \kappa$

$m_{13} = - \cos \omega \text{ sen } \varphi \cos \kappa + \text{sen } \omega \text{ sen } \kappa$

$m_{21} = -\cos \varphi \text{ sen } \kappa$

$m_{22} = -\text{sen } \omega \text{ sen } \varphi \text{ sen } \kappa + \cos \omega \cos \kappa$

$m_{23} = \cos \omega \text{ sen } \varphi \text{ sen } \kappa + \text{sen } \omega \cos \kappa$

$m_{31} = \text{sen } \varphi$

$m_{32} = - \text{ sen } \omega \cos \varphi$

$m_{33} = \cos \omega \cos \varphi$

En una **imagen de satélite** de tipo "**pushbroom**" cada línea de la imagen se puede considerar como una imagen "instantánea", similar a una foto aérea (figura 9).

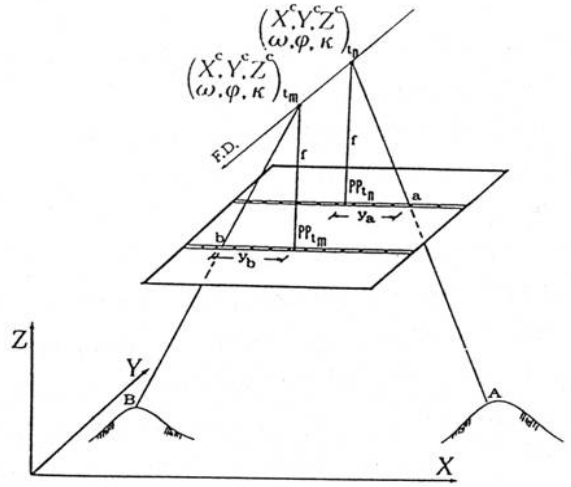


Figura 9.

Por tanto, en este caso los parámetros de orientación que intervienen en las ecuaciones de colinearidad se deben expresar como variables dependientes del **instante t** de toma de cada línea en concreto:

$$x_i = -f \frac{m_{11t}(X_i - X_t^C) + m_{12t}(Y_i - Y_t^C) + m_{13t}(Z_i - Z_t^C)}{m_{31_t}(X_i - X_t^C) + m_{32t}(Y_i - Y_t^C) + m_{33t}(Z_i - Z_t^C)}$$

$$y_i = -f \frac{m_{21t}(X_i - X_t^C) + m_{22t}(Y_i - Y_t^C) + m_{23t}(Z_i - Z_t^C)}{m_{31_t}(X_i - X_t^C) + m_{32t}(Y_i - Y_t^C) + m_{33t}(Z_i - Z_t^C)}$$

Donde:

x_i, y_i	son las coordenadas del punto i en la imagen (es decir: fila, columna)
X_i, Y_i, Z_i	son las coordenadas terreno del punto *i* (lógicamente estas coordenadas dependen del tiempo)
m_{ij}	son los elementos de la matriz de rotación del instante *t*
X^c_t, Y^c_t, Z^c_t	son las coordenadas del sensor en el instante *t*
f	es la distancia focal del sensor

Posición y actitud del satélite

Los **giróscopos** existentes a bordo del satélite registran varias veces por segundo las velocidades angulares de rotación en torno a los tres ejes de referencia. La integración de éstas desde el instante de toma de la primera línea de la imagen, permite calcular las variaciones de los tres ángulos durante la toma. Por otra parte, el **GPS** y el **sistema inercial** (IMU) proporcionan datos con los que se pueden calcular la posición y velocidad del satélite en cada instante t, por interpolación entre los puntos más próximos. Todos estos datos vienen grabados en la **cabecera** del fichero en que se suministra cada imagen. Desgraciadamente, la exactitud de los parámetros que se obtienen con esta información es insuficiente para nuestro modelo. Necesitaremos, pues, "**refinar**" nuestro conocimiento de los parámetros que definen las condiciones del satélite durante el tiempo de la toma.

Elección de los parámetros de la modelización

Un punto crítico es la elección de los parámetros que van a ser nuestras incógnitas. En principio, tendríamos 6 grados de libertad (3 posiciones y 3 giros) ¡para cada una de las líneas de la

imagen! Evidentemente, el cálculo resultaría imposible, por lo que nos vemos obligados a hacer suposiciones que **reduzcan el número de incógnitas**:

a) Supondremos que, si conocemos la posición y velocidad del centro de gravedad del satélite el instante de toma de la 1ª línea, podríamos predecir, por medio de las leyes teóricas de la orbitografía, la posición en el instante de toma de cualquier otra línea de la imagen, con una precisión suficiente.

b) Supondremos que las velocidades de rotación respecto a los tres ejes son constantes:

$$d\omega/dt = cte$$
$$d\varphi/dt = cte$$
$$d\kappa/dt = cte$$

- Con estas 2 suposiciones, el problema queda reducido a **12 parámetros**:

$$X^c_o\ ,\ Y^c_o\ ,\ Z^c_o$$
$$(dX^c/dt)_o\ ,\ (dY^c/dt)_o\ ,\ (dZ^c/dt)_o$$
$$\omega_o\ ,\quad \varphi_o\ ,\quad \kappa_o$$
$$d\omega/dt,\ \ d\varphi/dt,\ \ d\kappa/dt$$

Cálculo de los parámetros "exactos"

Para realizarlo necesitamos disponer de un cierto número de Puntos de Control geométrico. Partimos de unos parámetros aproximados que pueden ser o bien los nominales (los teóricos según la órbita prevista), o bien los calculados "a posteriori" después de la medida de la órbita efectiva.

Con estos parámetros procedemos a calcular las coordenadas en tierra de los puntos de apoyo a partir de las coordenadas imagen. Estas coordenadas se comparan con las reales, produciéndose unas discrepancias que hay que intentar anular, aplicando una determinada variación a los parámetros iniciales.

Para ello, nos basamos en ecuaciones que calculan las variaciones de las coordenadas terrestres calculadas, cuando aplicamos una variación en cada parámetro:

$$dX = f1(dXs)\ \ ;\ \ dY = g1(dXs)$$
$$dX = f2(dYs)\ \ ;\ \ dY = g2(dYs)$$
$$\text{.....}\qquad \text{.....}$$
$$\text{etc.}$$

Para la determinación de las incógnitas se puede aplicar un ajuste por mínimos cuadrados: por cada punto de apoyo k, se establecen unas Relaciones de Observación linealizadas, del tipo:

$$X_k - X_k^c = dXs(y_k)$$
$$Y_k - Y_k^c = dYs(y_k)$$

En el momento actual se han desarrollado programas de modelización paramétrica de imágenes SPOT, IKONOS, Quick Bird, etc… en varios organismos y empresas privadas de todo el mundo. En la actualidad, cada nuevo satélite que se lanza supone el desarrollo del correspondiente modelo geométrico paramétrico riguroso del mismo.

Efecto de la refracción atmosférica:

Uno de los puntos débiles de esta modelización es que desconocemos la influencia de la refracción atmosférica sobre las visuales. Esta, sin embargo, produce unas desviaciones muy superiores al error máximo admisible. ¿Cómo podemos, pues, hacer caso omiso de ella? Por fortuna, y al ser todas las visuales prácticamente paralelas, la refracción queda compensada en nuestro modelo por una variación consecuente de alguno de los parámetros, como por ejemplo, un ángulo. Es decir, que el parámetro que calculamos no es el real, sino uno que introducido en nuestro modelo hace que obtengamos el mismo resultado que si hubiésemos considerado el efecto de la atmósfera. Sin embargo, esto produciría problemas si quisiéramos relacionar imágenes independientes, sin puntos de apoyo entre ellas. Y lo mismo ocurriría en el supuesto de que conociésemos de antemano todos los parámetros de posición y actitud del satélite: aún así, no podríamos prescindir de algunos puntos de apoyo.

Remuestreo

Una vez logrado el modelo geométrico paramétrico de la imagen, la creación de la imagen corregida mediante el proceso de interpolación radiométrica es idéntica a la del método polinomial

45.2. "Rational polinomial coefficients" (RPC)

Un modelo paramétrico ó "físico" riguroso de la geometría de un sensor es, como acabamos de ver, el método más poderoso para trabajar geométricamente con una imagen. Sin embargo, dicho enfoque tiene algunos inconvenientes:

- Es muy complejo y requiere un software especializado para cada sensor en concreto
- Algunas veces, intencionadamente, no se dan a conocer los parámetros del sensor (focal, distorsiones, etc.) como en el caso del satélite Ikonos.

El modelo geométrico de RPC es un modelo matemático simple que demuestra[1] que se puede establecer una relación entre los píxeles de la imagen y su posición sobre el terreno mediante el cociente de 2 polinomios de tercer grado:

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)}$$

$$y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)}$$

Los polinomios P1, P2, P3, P4 tienen la forma:

$$\begin{aligned} P(X, Y, Z) = {} & a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + a_6XZ + a_7Y^2 + a_8YZ + a_9Z^2 \\ & + a_{10}X^3 + a_{11}X^2Y + a_{12}X^2Z + a_{13}XY^2 + a_{14}XYZ + a_{15}XZ^2 + a_{16}Y^3 \\ & + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 + a_{19}Z^3. \end{aligned}$$

Para calcular los **20 coeficientes** del polinomio del **numerador** y los **20** del polinomio del **denominador**, necesitamos un mínimo de **40 puntos de control**, y para calcularlos con garantías 2 o 3 veces más, como vimos antes. Como es muy difícil y costoso conseguir tantos puntos de control en una imagen, lo normal es utilizar un modelo paramétrico de la imagen: Una vez determinado dicho modelo paramétrico para la imagen concreta, se pueden generar fácilmente un gran número de puntos de control "**sintéticos**", que nos permiten calcular por mínimos cuadrados los 40 coeficientes. La pregunta inmediata es: si ya tenemos el modelo paramétrico ¿para que queremos los RPC? La respuesta es que una vez determinados los RPC, este modelo nos permite trabajar con una imagen determinada, sin necesidad de disponer de un software que incluya dicho modelo riguroso, lo cual facilita enormemente el uso de la imagen por cualquier usuario.

45.3. Ajuste en bloque de imágenes de satélite

Desde hace un tiempo se han desarrollado programas de orientación de bloque de imágenes de satélite, que funcionan de forma similar a los de aerotriangulación fotogramétrica: utilizan puntos de enlace, es decir puntos que se han identificado en dos o mas imágenes aun cuando no se disponga de sus coordenadas terreno para facilitar el cálculo de los parámetros de orientación de cada imagen (figura 10). La mayoría de estos programas son ampliaciones de programas ya existentes de aerotriangulación fotogramétrica.

[1] (Kaichang Di, 2002, "Rational Functions and Potential for Rigorous Sensor Model Recovery", Submitted to Photogrammetric Engineering & Remote Sensing)

Las ventajas de la triangulación de imágenes de satélite con respecto a la corrección escena a escena son:

- **Disminución del número total de puntos de control terrestre** necesarios (a cambio de utilizar puntos de enlace entre las distintas imágenes)
- Mayor **robustez** del resultado, ya que permite detectar mejor los puntos erróneos.

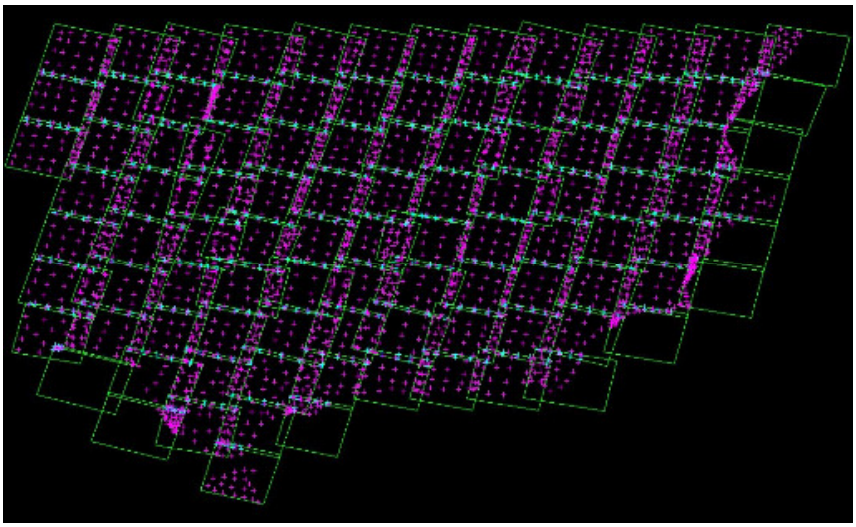


Figura 10. Puntos de control y de enlace en un bloque de imágenes de satélite

45.4. Aplicaciones topográficas

Desde los comienzos de la Teledetección, esta se había considerado como una herramienta útil exclusivamente para estudios temáticos y medioambientales, ya que la baja resolución de los sensores no permitía su uso para casi ninguna aplicación cartográfica. El lanzamiento en 1988 de SPOT 1 empieza a cambiar esta percepción, con sus 10 m de resolución en modo pancromático y su capacidad estereoscópica. En Septiembre de 1999 se lanzó el Ikonos, lo que supuso una revolución total en la concepción de la utilidad de las imágenes de satélite. La utilización de imágenes de satélite para realizar directamente cartografía topográfica se presenta como una alternativa para territorios de difícil acceso en los que es difícil o imposible realizar vuelos fotogramétricos convencionales por motivos logísticos. El coste por Km^2 de las imágenes es mucho menor en los satélites de baja resolución, que con las fotos aéreas, pero a su vez es mayor en los satélites de alta resolución. En el futuro es posible que las imágenes de alta resolución resulten competitivas con las fotografías aéreas incluso en zonas "normales", siempre y cuando los precios vayan bajando progresivamente, cosa previsible dado el gran número de satélites de alta resolución previstos. Por otra parte, estos satélites de alta resolución tienen un papel trascendental cuando lo que se pretende en cartografiar zonas sobre las cuales es

imposible realizar un vuelo fotogramétrico convencional (zonas de guerra, de otros países o inaccesibles).

Ayuda a la generalización de mapas derivados de pequeña escala

El proceso normal de realización de los mapas a pequeñas escalas (1/200.00, 1/500.000, 1/1.000.000, etc) es el de "generalización cartográfica" a partir de mapas a escalas mayores (1/25.000, 1/50.000, etc). La generalización es una de las operaciones más importantes y delicadas de la cartografía, y si no se hace bien puede producir mapas de mala calidad. Consiste en "simplificar" el mapa de escala mayor, seleccionando y eliminando una parte de la información, para que al reducir de escala las líneas no se "empasten" y el mapa resultante sea legible y se pueda trabajar fácilmente con él. Esto tiene dos problemas, más graves cuanto más pequeña es la escala del mapa derivado:

1) Los inevitables errores de generalización se van acumulando en los sucesivos pasos de una escala a otra, de forma que al llegar a la última escala, "todo parecido con la realidad puede ser mera casualidad". Si se intenta hacer en un solo paso (por ejemplo, del 1/25.000 al 1/1.000.000) el resultado puede ser aún peor, debido a la falta de "perspectiva" del cartógrafo al trabajar por trocitos diminutos.

2) Para conseguir un mapa derivado actualizado, es imprescindible que todos los mapas a escalas mayores que intervienen en él estén a su vez actualizados. Esto es casi imposible de conseguir, sobre todo con una situación cartográfica como la española, y se intenta suplir mediante información complementaria (proyectos de obras realizadas, descripciones literales, mapas a grandes escalas de los ayuntamientos, etc), pero los resultados no son nunca satisfactorios.

Para intentar paliar estos dos problemas, pueden ser de gran ayuda las imágenes de satélite, ya que:

- Por una parte la gran extensión del territorio que abarcan de una sola vez proporciona la "visión sintética" necesaria para corregir los errores de generalización (por ejemplo: trazado de la línea de costa, anchura de los embalses, forma de los ríos, etc.)
- Por otra parte, su precio por Km2 relativamente económico, hace posible disponer de imágenes bastante actuales en todo momento, en las cuales se detectan una gran parte de los cambios existentes en el territorio desde la última actualización del mapa.

45.5. Equilibrado radiométrico y mosaico de las imágenes

Casi siempre resulta necesario utilizar varias escenas de satélite o imágenes aéreas para cubrir la superficie de una hoja. Ello nos obliga a realizar un proceso de "mosaico" de las mismas, para generar una imagen continua sin que se aprecie la unión. Uno de los problemas que surgen al

hacer mosaicos de imágenes de satélite de distintas fechas es el de las diferencias radiométricas (es decir de tonalidad) entre ellas. Debido a los cambios en las condiciones de toma (altura y acimut del sol, ángulo de incidencia, condiciones atmosféricas...) así como la calibración del sensor y los cambios en el terreno (humedad, vegetación, topografía...), las imágenes difieren mucho de unas a otras, como se puede ver en la figura 11.

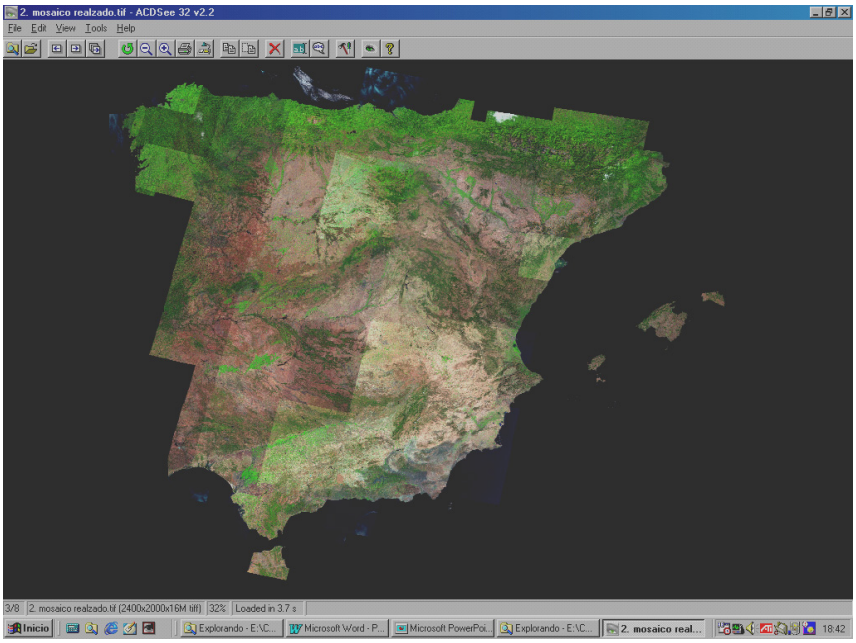


Figura 11. Mosaico de imágenes de satélite sin equilibrado radiométrico previo

Hay dos enfoques para afrontar este problema:

a) *Corrección física o "determinista"*: intentar conocer todas las circunstancias de la toma de la imagen y mediante modelos físicos adecuados (del comportamiento radiométrico de la atmósfera, de la reflectancia bidireccional del terreno, del sensor, etc.) pasar de valores digitales a valores de reflectancia vertical para cada uno de los píxeles. Este enfoque, a pesar de ser el más lógico a priori, tiene graves inconvenientes que han hecho que los resultados obtenidos hasta el momento sean muy parciales. En efecto:

- No conocemos con suficiente precisión la composición, y por tanto el comportamiento radiométrico, de la atmósfera en cada punto y en cada instante.
- No conocemos tampoco las reflectancias bidireccionales de cada píxel.
- La calibración del sensor es solamente aproximada.
- Las variaciones en la respuesta radiométrica del terreno (por cambios de vegetación y humedad del suelo) son prácticamente imposibles de modelizar y corregir físicamente.

b) *Corrección "empírica"*: se basa en comparar las distintas imágenes entre sí a través de las zonas que tienen en común, y sacar conclusiones sobre las variaciones entre ellas, modelizar estas variaciones y corregirlas aplicando una transformación a cada imagen que iguale los

valores digitales de las distintas imágenes para esas zonas comunes. El método empírico que se suele utilizar para ajustar radiométricamente dos imágenes se basa en suponer que, para cada banda, existe una relación lineal entre los valores digitales de ambas imágenes. Esta suposición, que puede parecer gratuita, no lo es tanto ya que la mayoría de los factores que producen variaciones radiométricas tienen expresiones lineales.

Dadas dos imágenes con una zona común o de solape, se trata de calcular la transformación a aplicar a la imagen 2 para hacerla coincidir con la 1. Para ello, nos basamos en los valores de media (μ) y desviación típica (σ) de los valores digitales en una o varias áreas "de control" coincidentes en ambas imágenes, situadas dentro de la zona de solape. (Evidentemente es necesario tomar áreas que no contengan nubes ni ningún otro elemento distorsionante).

Sean las estadísticas de una banda (μ,σ)en la zona común:

(μ_1, s_1) para la imagen 1

(μ_2, s_2) para la imagen 2

Aplicamos a la imagen 2 la transformación lineal:

$x_2' = a.x_2 + b$ (donde x es el nivel digital de la imagen)

Imponemos: $\mu_2' = \mu_1$

$\sigma_2' = \sigma_1$

Y como: $\mu_2' = a.\mu_2 + b$

$\sigma_2' = a.\sigma_2$

Tendremos las dos ecuaciones:

$a.\mu_2 + b = \mu_1$

$a.\sigma_2 = \sigma_1$

Y por tanto:

$a = \sigma_1 / \sigma_2$

$b = \mu_1 - \mu_2 (\sigma_1/ \sigma_2)$

Para el caso de n imágenes se pueden aplicar las mismas fórmulas, ajustándolas por mínimos cuadrados, obteniéndose muy buenos resultados (figura 12).

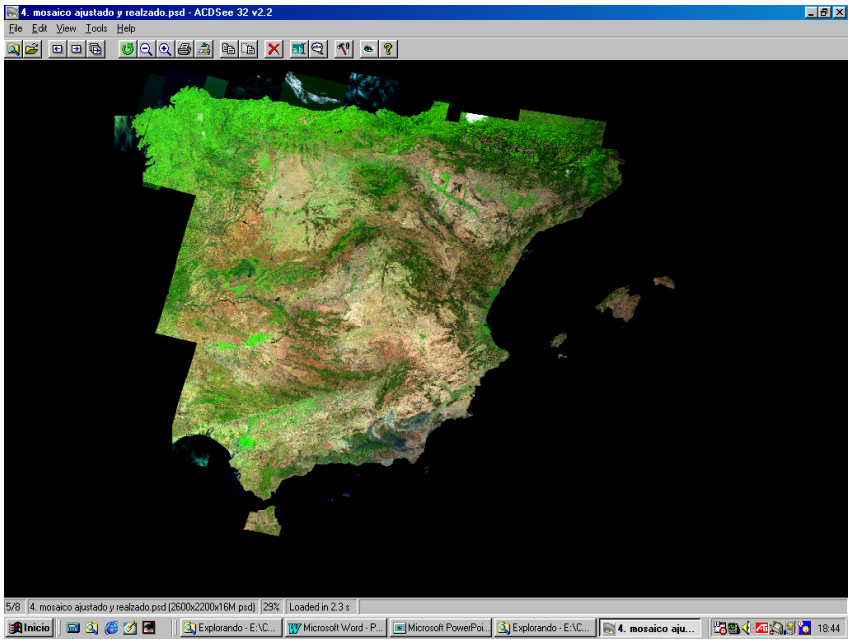


Figura 12. Mosaico de imágenes de satélite después del equilibrado radiométrico

También se puede usar una imagen de satélite de menor resolución (y que por tanto abarcará una zona mayor) como referencia radiométrica común.

Equilibrado radiométrico de fotos aéreas

El equilibrado radiométrico de las ortofotos aéreas es mucho más problemático que en el caso de las imágenes de satélite, ya que debido a la gran apertura de campo y a las características ópticas del objetivo, se producen varios fenómenos que modifican la radiometría de los píxeles en función del ángulo respecto al eje óptico:

- "Vignetting" (oscurecimiento de los bordes del fotograma debido a la influencia de la montura del objetivo en los bordes de la imagen)
- Disminución radial de la luminosidad del objetivo
- Diferencias de camino óptico en la atmósfera
- Comportamiento "no lambertiano" de las superficies naturales (cambios de la reflectancia del terreno según la dirección de toma

Todo esto hace que no se pueda equilibrar la radiometría de las distintas fotos con un simple ajuste de histogramas mediante una transformación lineal. En lugar de ello, es necesario aplicar un algoritmo de "homogeneización" de la radiometría de cada foto antes de mosaicarlas (Villa, 1987). Este proceso es precisamente uno de los puntos críticos de los procesos de realización de ortofotos digitales.

45.6. Obtención de modelos digitales de elevaciones (mde) por correlación automática de imágenes

Una vez se dispone de un modelo geométrico paramétrico riguroso de una imagen de satélite, y aprovechando la posibilidad de visión estereoscópica con las imágenes oblicuas en algunos tipos de satélites es relativamente sencillo el diseño de un algoritmo de restitución estereoscópica y su implementación en el software de una estación fotogramétrica digital. Para determinar las coordenadas X,Y,Z de un punto de una imagen no hace falta más que encontrar su homólogo en la otra imagen del par estereoscópico. La tarea de identificación de puntos homólogos la realiza instintivamente el operador de restitución ya que, para el ojo humano, es una operación trivial. Sin embargo, esto consume la mayor parte del tiempo de restitución. La idea de automatizar dicha búsqueda de puntos homólogos resulta, pues, muy atractiva. Los algoritmos de correlación automática realizan la comparación de una pequeña "ventana" (zona alrededor del punto considerado) en la foto izquierda, con las distintas posiciones posibles del punto homólogo en la otra foto, y determinan cual es la posición de mejor ajuste (la de correlación más alta, es decir, aquella en que ambas ventanas son más parecidas). El centro de la ventana en esa posición queda identificado como el punto homólogo buscado. Lo que obtenemos es, pues, una serie de cotas de una malla regular; es decir un Modelo Digital del Terreno. Los algoritmos existentes se han ido refinando cada vez más, y alcanzan en la actualidad un alto grado de sofisticación.

Geometría Epipolar

Este es un concepto desarrollado desde hace mucho tiempo en Fotogrametría clásica, y que permite convertir la búsqueda de puntos homólogos (correlación) en un proceso unidimensional. Como se estudia en fotogrametría, todo plano que pase por los dos centros proyectivos de un par fotogramétrico (plano Epipolar o plano nuclear) corta a los dos planos focales en dos rectas (rectas epipolares) que tienen la siguiente característica: cualquier punto de una de ellas tiene su homólogo en la otra. Es decir, que el homólogo de un punto cualquiera de la foto izquierda habrá que buscarlo exclusivamente en la recta de intersección del plano Epipolar que pasa por ese punto, con el plano focal en la foto derecha. Este proceso de correlación automática puede aplicarse también a las imágenes de sensores “pushbroom”, siempre que se disponga del modelo paramétrico de la geometría. La única diferencia sustancial es que, al tratarse de imágenes de barrido en las que no hay un plano focal, no existen rectas epipolares. Estas se sustituyen por las llamadas "curvas casi-epipolares", que se pueden calcular y cumplen la misma función.

Estereoscopía "along orbit"

Una dificultad añadida respecto al caso de fotos aéreas es la diferencia de fechas entre ambas imágenes, que hace más aleatorio el proceso de correlación, aumentando la posibilidad de obtener zonas erróneas. Este problema se ha resuelto últimamente con el diseño y lanzamiento de satélites dotados de 2 sensores gemelos (SPOT 5 HRS, Cartosat 2,…) apuntando hacia delante y hacia atrás de la órbita, lo que permite obtener 2 imágenes estereoscópicas casi simultáneas y por tanto idénticas radiométricamente. Es la llamada esteroscopía "along orbit".

45.7. Sensores de alta resolución para cartografía

Estos sensores suelen llevar una banda pancromática de alta resolución espacial, combinada con otras 3 ó 4 multiespectrales. Mediante técnicas de "Pansharpening" se consiguen imágenes en color de alta resolución. Al tratarse de sensores Pushbroom, las bandas más empleadas son: pancromático, azul, verde, rojo e Infrarrojo Próximo. En algún caso concreto (SPOT5) se agrega una banda en el SWIR de menor resolución.

Capacidad estereoscópica

Muchos de estos satélites están dotados de capacidad de apuntamiento lateral o longitudinal, lo que permite la visión estereoscópica "along-orbit" o "across-orbit".

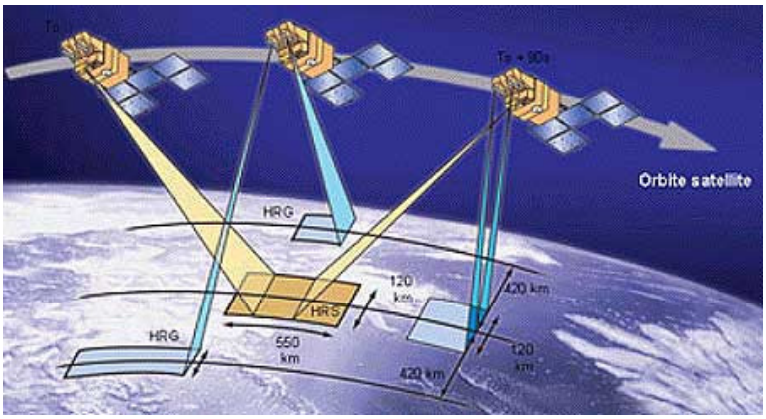


Figura 13. Capacidad estereoscópica de SPOT5

En el siguiente cuadro se presentan algunos de los sensores más utilizados para cartografía topográfica desde el espacio.

SENSOR	TAMAÑO PÍXEL	Nº BANDAS Y RANGO ESPECTRAL (µm)	TAMAÑO ESCENA (km x km)	PRECIO (pan) Euros/km2	NÚMERO DE ESCENAS/PRECIO TODA ESPAÑA	RES. TEMPORAL
QuickBird	0,60 m (1 banda pan) 2,44 m (4 bandas vis-IRP)	5: 3 visible (0,45-0,69) 1 IRP (0,76-0,90) 1 pan (0,45-0,90)	16,5 x 16,5	16,50	No disponible 9.075.000 €	4-7 días
IKONOS	1 m (1 banda pan) 4 m (4 bandas vis-IRP)	5 : 3 vis (0,445-0,698) 1 IRP (0,757-0,853) 1 pan (0,45-0,90)		15,70	No disponible 8.635.000 €	3 días
OrbView 3	1 m (1 banda pan) 4 m (4 bandas vis-IRP)	5 : 3 vis (0,450-0,695) 1 IRP (0,76-0,90) 1 pan (0,45-0,90)	8 x 8	7,85	No disponible 4.317.500 €	3 días
EROS	1,8 m	1 pan (0,5-0,9)	14 x 14	_	_	4 días
SPOT-5	2,5-5 m (1 banda pan) 10 m (3 bandas vis-IRP) 20 m (1 banda IRM)	5: 2 vis (0,50-0,68) 1 IRP (0,79-0,89) 1 IRM (1,58-1,75) 1 pan (0,61-0,68)	60 x 60	6.200 (precio escena)	225 escenas 787.500 € (5 m) 1.395.000 € (2,5 m)	3-26 días
IRS-LISS4	5,8 m	3: 2 vis (0,52-0,69) 1 IRP (0,77-0,86)	70 x 70	2.500 (precio escena)	240 escenas 600.000 €	5 días

Figura 14. Sensores más utilizados para cartografía

(Fuente: Informe elaborado por Marcos Pavo en el IGN)

SEOSAT (Spanish Earth Observation Satellite -Sistema Español de Observación de la Tierra)

Es un futuro satélite de observación de la tierra con fines cartográficos, medioambientales y de observación de la ocupación del suelo, previsto para ser lanzado en 2011. Aunque todavía está en fase de definición, sus características propuestas son las siguientes:

	Pancro-mático	Multiespectral			
		Banda-1 (Blue)	Banda-2 (Green)	Banda-3 (Red)	Banda-4 (NIR)
Rango Espectral (µm)	0,45 – 0,68	0,45 – 0,52	0,52 – 0,60	0,63 – 0,69	0,76 – 0,90
GSD (m)	2,5	10			
Campo angular (º)	2,6	2,7			
Anchura de la traza en Tierra @ 669km altura orbital	60 km				
Digitalización	12 bits/pixel				

Tabla 1. Características del SEOSAT

45.8. Cartografía de imagen: ortoimágenes

Las **ortoimágenes** son **un nuevo tipo de cartografía topográfica** en la que se representa el terreno mediante imágenes aéreas ó de satélite, en lugar de hacerlo mediante líneas dibujadas. Se debería, por tanto, distinguir entre **cartografía topográfica "de línea" y cartografía topográfica "de imagen".**

Combinaciones de bandas

Si las imágenes que se utilizan tienen más de tres **bandas espectrales**, hay que elegir entre ellas la combinación que se va a asignar a los tres colores básicos (rojo, verde y azul) para su visualización. En el caso de **Thematic Mapper**, con 6 bandas de 30 m de resolución (sin contar con la banda térmica), se pueden realizar ¡120 combinaciones distintas! Incluso en el caso de que tengamos sólo 3 bandas multiespectrales, como en **SPOT 1, 2 y 3**, se pueden realizar 6 permutaciones distintas. La elección de la combinación más adecuada a nuestros fines es una tarea difícil. Para ello nos podemos basar en la sensibilidad de cada banda a los fenómenos que queremos reflejar, pero lo normal es aprovechar las experiencias previas descritas en la literatura. Una división importante es la que se puede hacer entre **combinaciones "en falso color"** y **combinaciones "en color natural"** o "seudo-natural". Entre las primeras, las más habituales son las que recuerdan a los colores de las fotos aéreas infrarrojo-color, en las que la vegetación se ve en rojo, más vivo cuanto más intensa es ésta. Ejemplos de este tipo de combinaciones son la 3,2,1 de SPOT (para R,V,A respectivamente) y la 4,5,3 de Thematic Mapper (TM), utilizada para la realización del **proyecto Corine Land Cover** en España.

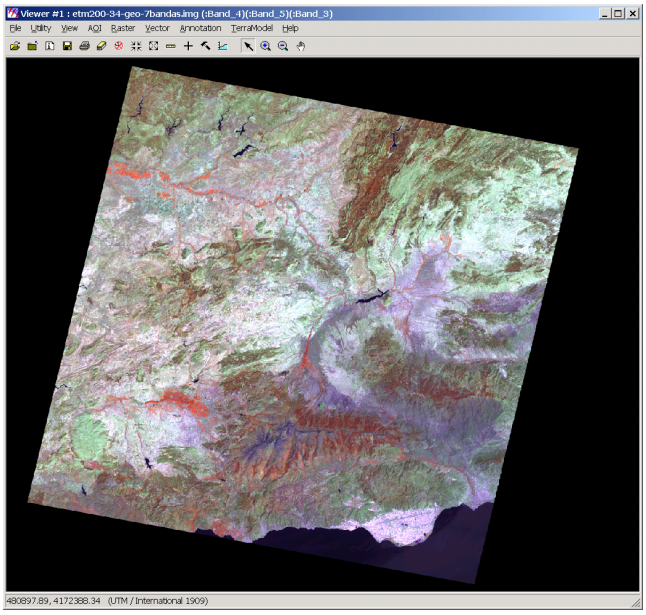


Figura 15. Combinación de bandas TM 453

Entre las combinaciones de color natural, la primera que se suele mencionar es el teórico "color natural" de **Thematic Mapper**, es decir la **3,2,1**. Esta combinación tiene los inconvenientes de que el azul queda muy afectado por la difusión en la atmósfera y de que la vegetación destaca poco, al no incluirse ningún infrarrojo. Una alternativa interesante es la combinación **TM 5,4,3**, que produce unos colores que recuerdan mucho a los naturales, tanto en la vegetación como en el suelo desnudo, y sin embargo la vegetación destaca considerablemente. Esta es la combinación elegida para las series de Ortoimágenes de satélite del **Instituto Geográfico Nacional**, por ejemplo. Naturalmente, los colores varían mucho según el tipo de realce que se aplique. En el caso de las ortoimágenes del IGN, éstos se han hecho intentando que los colores resultantes fuesen lo más parecidos posible a los naturales.

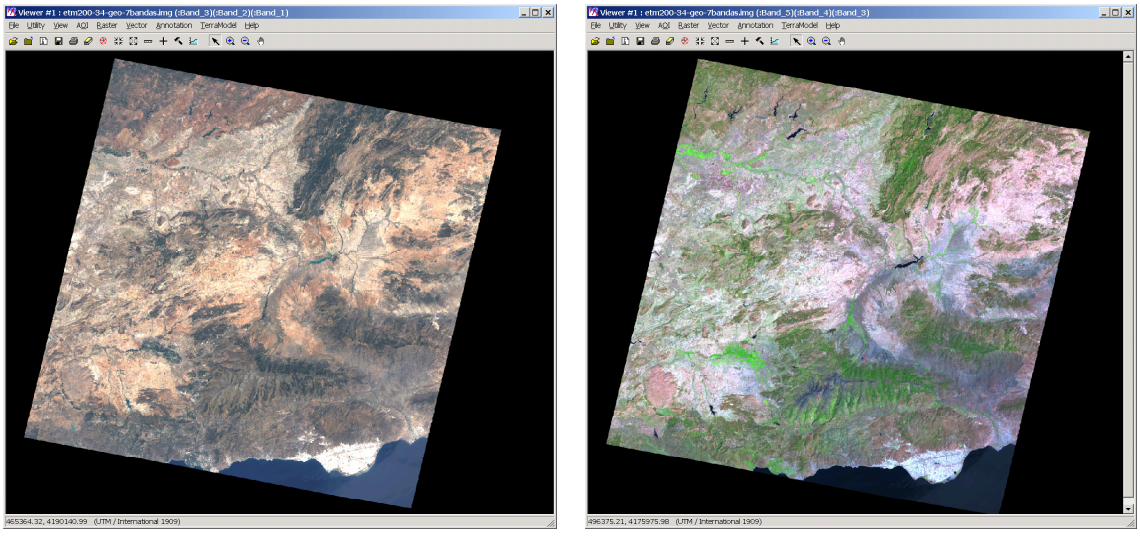


Figura 16. Comparación color natural (izquierda) y pseudo-natural (derecha)

A veces se discute si las combinaciones en falso color son mejores que las de color natural para fotointerpretar. Un ejemplo concreto es el de las combinaciones 4,5,3 y 5,4,3 para TM citadas anteriormente. Aunque algunos opinan que la primera es mejor, existen estudios (Chicharro y Vega, 1993) que aseguran que la precisión de la fotointerpretación realizada con ambas combinaciones es similar.

Elección de la resolución de la imagen

Dada nuestra agudeza visual, la resolución adecuada de una imagen impresa sobre papel para observarla a distancia normal sin que se aprecie el píxel a simple vista, es de unos **10 píxeles por milímetro** (es decir 0,1 mm por píxel) equivalentes a **254 píxeles por pulgada**, que es la que proporcionan aproximadamente los sistemas modernos de impresión.

Realce visual

Llamamos realce visual de una imagen los tratamientos digitales que se le aplican destinados a mejorar su visualización, interpretabiidad o estética. Se suele realizar una **expansión del contraste** (lo mejor es determinarla "a mano", interactivamente) y un filtrado de realce de bordes (**filtro de "paso alto"**). Para esta tarea, así como para otros retoques de las imágenes, son mucho mejores los programas de "retoque fotográfico" (como por ejemplo Photoshop) que los de Teledetección propiamente dicha.

Adición de elementos vectoriales

Para aumentar la utilidad de la imagen y facilitar su interpretación, se suelen incluir elementos tales como: rotulación (**toponimia**), **líneas límite**, etc. Alguna vez se incluyen **curvas de nivel**, pero suelen empastar demasiado la imagen. En general hay que tener cuidado con estos elementos, porque si son excesivos o no están bien estudiados pueden dificultar notablemente la visualización de la imagen. Muchas veces se da al mar un tono azul "sintético", para cubrir las discontinuidades de las imágenes y mejorar la estética.. Alrededor de la imagen se suele disponer información complementaria, como: nombre de la hoja, escala, centro que la ha procesado y características de las imágenes empleadas. Si se trata de una tirada de muchos ejemplares se suelen añadir además un mapa de situación, esquema de las hojas, portada, escala gráfica, descripción de la proyección cartográfica, método de realización, etc. Las ortofotos a las que se les han añadido todos estos elementos, se suelen llamar Ortofotomapas. Los elementos de línea y los textos no se integran como parte de la imagen digital, ya que ésta se reproduce mediante tramado, cosa que es inadecuada para dichos elementos. En vez de ello, se trazan como elementos "vectoriales". Para diseñarlos se puede usar cualquier programa de CAD (Autocad, Microstation, etc) o de dibujo vectorial (como Corel Draw, Adobe Ilustrator, etc.)

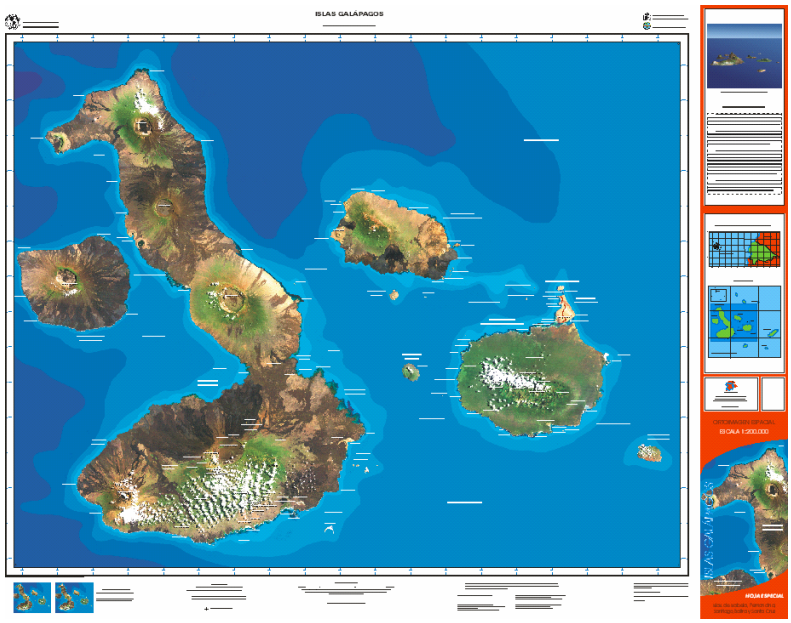


Figura 17. Cartografía de imagen de satélite (mosaico de escenas Landsat Thematic Mapper) con marco y toponimia. Este producto suele llamarse "Ortoimagen de Satélite"

Hoy en día, casi todos los organismos cartográficos realizan series de ortoimágenes de satélite y de ortofotos digitales, a diversas escalas. En España, el **Instituto Geográfico Nacional** ha realizado ortoimágenes de satélite de toda España con Thematic Mapper, en color natural, a escalas 1/100.000, 1/250.000 y 1/500.000, así como la serie Ortofotomapa Nacional 1:25.000.

La serie cartográfica desarrollada por el IGN bajo el nombre de "Cartoimágenes 1:200.000" combina información ráster e información vectorial cubriendo cada una de las provincias españolas. La información ráster empleada para componer cada hoja procede de las imágenes de los satélites Landsat o SPOT. La información vectorial procede de los ficheros DGN de la Base Cartográfica Numérica a escala 1:200.000 (BCN200) importados a la base de datos SIG200 creada "ad hoc" para la explotación a través de sistemas SIG. Los procesos aplicados son los siguientes:

1. *Selección y Edición de fenómenos geográficos: Geometría Fuente vs. Geometría Mapa*

   Mediante consultas SIG efectuadas directamente a la BDG se obtienen los fenómenos geográficos a representar. La BD se caracteriza por servir de fuente de información para una multitud de productos cartográficos. No toda la información contenida en la BD es utilizada para la producción de cartoimágenes.

La posición espacial de los fenómenos almacenados en la BD corresponde a su posición real en el terreno. Pero esta posición geométrica es necesario editarla para componer un producto cartográfico atractivo y legible por el usuario donde, entre otros casos, los edificios y las carreteras no aparezcan solapados y los cruces de las carreteras figuren correctamente identificados.

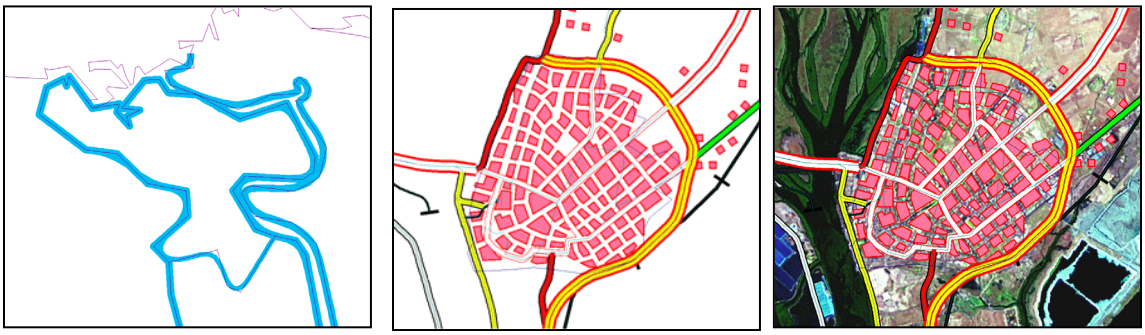


Figura 18. Geometría Fuente y Geometría Mapa.

2. *Diseño de estilos y celdas*

   Se selecciona para cada entidad geográfica un estilo de línea y/o área similar a los empleados en la cartografía impresa hasta el momento. Para los fenómenos puntuales se emplean celdas importadas directamente desde ficheros DGN.

   Estas operaciones son prácticamente automatizadas por cualquier SIG y, una vez fijadas como reglas, se repiten para cualquier Base de Datos.

3. *Obtención y colocación de textos y topónimos*

   El manejo de entidades textuales y su correcta ubicación de cara a la publicación cartográfica en papel es la fase más crítica y compleja de cualquier SIG. Si bien es cierto que no está del todo depurada y aún exige demasiada asistencia por parte de un operador experto en cartografía.

   Los textos se importan en el SIG a partir de los almacenados en los antiguos ficheros DGN como entidades textuales utilizando fuentes similares a las ya empleadas. Posteriormente son desplazados para evitar solapes con otros elementos. Actualmente existen herramientas informáticas (LabezEZ de MapText) que automatizan la localización de textos y etiquetas consiguiendo óptimos resultados.

4. *Incorporación de la imagen de satélite*

   Esta imagen procede del Área de Teledetección, y se incorpora al sistema siguiendo los siguientes pasos:

- Inserción de una máscara con translucencia del 70% de la zona externa a la provincia de que se trate, resaltando esta provincia.

- Inserción de una máscara blanca que ajuste el recuadro de la imagen al tamaño final de la cartoimagen.
- Inserción de máscaras de color azul con intensidad graduada que indiquen la profundidad de la zona marítima.

  Tanto la imagen como cada una de estas máscaras entran en la leyenda de la aplicación en diferentes capas con la posibilidad de ordenarlas, activarlas,…

Composición del marco, la leyenda y la portada

Las imágenes del marco, la leyenda y la portada son importadas al sistema como imágenes ráster georreferenciadas. Al igual que la imagen de satélite, entran en la leyenda en capas diferentes. Al tratarse de imágenes georreferenciadas, éstas se incorporan en su posición correcta acoplándose perfectamente al resto de los datos geográficos.

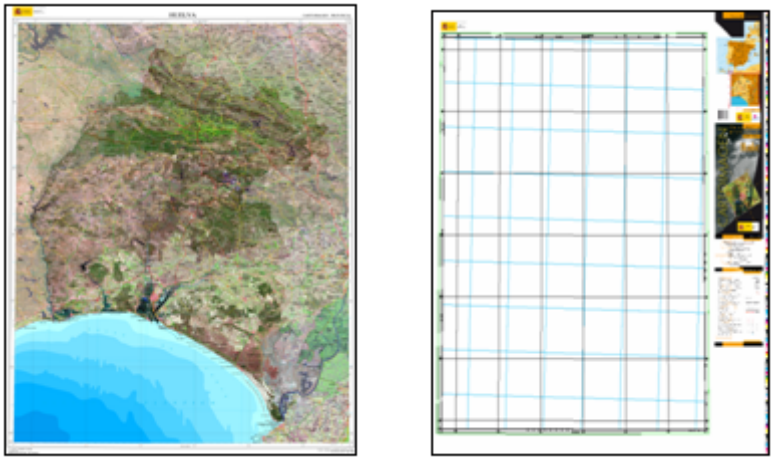


Figura 19. Marco, Leyenda y Portada. Superposición con la información ráster.

Generación del PDF listo para imprimir

La última fase, también incorporada en las herramientas SIG de última generación, consiste en la generación del archivo PDF legible para los sistemas de impresión a gran escala. El fichero PDF generado tiene unas dimensiones de 71,8 cm x 93.8 cm y contiene toda la información compilada para componer la cartoimagen:

- Información vectorial de las entidades geográficas seleccionadas,
- Etiquetas (topónimos) y celdas,
- Imagen ráster, máscaras correctoras y resaltadoras de la imagen, marco, leyenda y portada.

45.9. Actualización de cartografía

Uno de los mayores problemas de la cartografía topográfica es la necesidad de su actualización constante. El elevado costo de realización de la revisión por técnicas convencionales ha hecho que se piense en las imágenes de satélite para facilitar o abaratar esta tarea. Incluso para los casos en que en la imagen no se llegan a apreciar los suficientes detalles para realizar el dibujo directamente a partir de la misma, ésta es una guía para saber en qué zonas ha habido cambios y hay por tanto que conseguir información complementaria a base de otros documentos o de salidas al terreno. La forma más práctica de utilizar una imagen de satélite para actualizar una hoja de mapa topográfico es presentar en pantalla al mismo tiempo la imagen (información "raster") y las líneas del mapa a actualizar (información vectorial) superpuestas sobre ella. Para ello hace falta, para empezar, que la imagen esté corregida en la misma proyección cartográfica que el mapa y en segundo lugar un programa que permita visualizar ambas cosas en pantalla al mismo tiempo (integración raster-vector). Hay varios programas tanto de Teledetección (Erdas Imagine entre otros) como de CAD (Microstation, etc) que permiten realizar esta integración con mayor o menor calidad de imagen, facilidad y flexibilidad en cuanto a formatos de imagen y vectorial.

Bibliografía

[1] Bernstein, R., Image Geometry and Rectification. En R.N. Colwell (Ed.) Manual of Remote Sensing, 2e, Chapter 21, Falls Church, Va. American Society of Photogrammetry, 1983.

[2] Chicharro, E y Martínez Vega,J. El análisis visual de imágenes espaciales en la enseñanza de la geografía. En Serie Geográfica 2. Universidad de Alcalá. Dpto. de Geografía, 1993.

[3] Kaichang Di, 2002, “Rational Functions and Potential for Rigorous Sensor Model Recovery”, Submitted to Photogrammetric Engineering & Remote Sensing)

[4] Villa, G. Corrections radiometriques de photographies aeriennes n&b numerisees en vue de la realisation de mosaiques d'ortophotos: une metohode polynomiale. Memoire de stage du DESS. Université Paris VI, 1987.

[5] Villa, G. Ajuste radiométrico conjunto de varias imágenes de satélite para la realización de mosaicos de ortoimágenes. Ponencia en la V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Las Palmas, 1993.

Tema 46. Clasificación automática de imágenes multiespectrales: Clasificación no supervisada y supervisada. Clasificación mediante segmentación de objetos. Clasificación mediante sistemas expertos, redes neuronales, subpixel, análisis textural, fuzzy. Análisis de resultados. Fuentes de error. Medidas de la fiabilidad. Técnicas de revisión por muestreo. Análisis estadístico de la matriz de confusión.

46.1. Clasificación no supervisada y supervisada

La clasificación de imágenes persigue sustituir la interpretación visual de la información contenida en la imagen por una valoración cuantitativa de sus propiedades radiométricas y espectrales. El resultado del proceso de clasificación es una imagen en la que cada píxel de la imagen original se ha asignado a una o varias de las clases contenidas en la leyenda del proceso. Aunque la finalidad es hacer el proceso de asignación más cuantitativo y objetivo, la participación humana y la interacción experta es una clave fundamental del éxito de la clasificación. La clasificación se basa en un conjunto de criterios objetivos sobre las variables de la imagen, el cual, basándose en análisis cuantitativos, realiza una distribución en clases de todas las unidades elementales contenidas en la imagen.

La clasificación de imágenes es esencialmente un proceso de toma de decisiones con datos que presentan una considerable variabilidad estadística, por lo que la asignación de un píxel o agrupación de píxeles a una clase determinada lleva asociada, desde el punto de vista estadístico, una cierta probabilidad de error. Por lo tanto, supone categorizar una imagen multibanda, lo que en términos estadísticos supone reducir la escala de medida, de una variable continua (los ND originalmente detectados por el sensor) a una escala categórica (tipos de vegetación) u ordinal (densidades de vegetación)

Clasificación Multiespectral: Proceso de asignar píxeles dentro de un número finito de clases, basados en los valores de los mismos (ND: nivel digital del píxel). Si el píxel satisface un cierto conjunto de criterios, es asignado a la clase que se corresponde con los mismos.
El ND de un píxel clasificado, en definitiva, es el identificador de la clase en donde se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubierta (variable nominal o categórica), o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Una

clasificación de especies vegetales estaría dentro del primer grupo, mientras un intento de señalar niveles de afectación en un incendio forestal o de humedad en el suelo, en el segundo.

Ventajas: es posible el análisis de todas las bandas de la imagen. Con el uso de los ordenadores actuales, permite la automatización y mayor rapidez del análisis de los datos.

Fases del proceso de clasificación:

1) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento)
2) agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación)
3) comprobación y verificación de resultados.

Fase de Entrenamiento:

Consiste en la definición de las clases a partir de sus características dentro de la imagen. Existen dos métodos: supervisado y no supervisado.
Resultado: conjunto de signaturas; cada signatura corresponde a una clase. Una signatura es un conjunto de parámetros estimados tras el entrenamiento que utilizará el algoritmo de clasificación para realizar dicha clasificación

Fase de Clasificación:

Después de haberse definido las signaturas, los píxeles de la imagen se asignan a las distintas clases mediante el uso de una regla de decisión. La regla de decisión es un algoritmo matemático que, usando los datos contenidos en la signatura, realiza la asignación de los píxeles a las distintas clases establecidas en la leyenda.

46.1.1. Fase de entrenamiento

El primer paso en cualquier proceso de clasificación es el "entrenamiento del clasificador" para poder reconocer las clases de interés. Este aspecto de la clasificación es crítico para el éxito del proceso y frecuentemente ocupa la mayor parte del tiempo del analista. Por cuanto se trata de una clasificación basada en los valores numéricos de los píxeles, esta caracterización debe ser numérica, para obtener el rango de ND, que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

En la realidad, diversos factores introducen una cierta dispersión en torno al comportamiento espectral medio de cada cubierta o clase de la leyenda, dependiendo de la categoría y de la complejidad del territorio, lo que supone que existe una cierta dispersión en torno al ND medio de cada categoría. Por esto, la fase de entrenamiento resulta ciertamente compleja, ya que se tendrá que definir con rigor cada una de las categorías, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio.

Para realizar la fase de entrenamiento, debemos proporcionar al algoritmo de clasificación una muestra de píxeles de la imagen, que representen adecuadamente a las categorías de interés. A partir de esos píxeles pueden calcularse los ND medios y la variabilidad numérica de cada categoría, en todas las bandas que intervienen en la clasificación. Para obtener resultados precisos hay que identificar debidamente las distintas categorías, reduciendo a lo imprescindible los trabajos de campo. Al igual que en otras aplicaciones del muestreo, las estimaciones posteriores se basan sobre la muestra seleccionada, por lo que una incorrecta selección de ésta conducirá inexorablemente a pobres resultados en la clasificación posterior. El resultado del entrenamiento son las signaturas, es decir, el conjunto de parámetros estimados tras el entrenamiento que utilizará el algoritmo de clasificación. Cada signatura corresponde a una clase.

Existen básicamente dos procedimientos para caracterizar las clases.

Entrenamiento supervisado: el analista utiliza un conocimiento previo de las clases, derivado de la revisión de campo, la fotointerpretación y otras fuentes (mapas temáticos, etc.), a partir del cual se centra en pequeñas regiones de la imagen a ser clasificada que son identificadas como pertenecientes a una cierta clase de interés. Estas pequeñas regiones se denominan áreas de entrenamiento, en la bibliografía anglosajona, *training fields*. A continuación se calculan los vectores de medias y las matrices de covarianza de las distintas clases y se utilizan en la fase posterior de asignación del resto de los píxeles de la escena a alguna de las clases previamente consideradas.
Para una localización más precisa de estas áreas de entrenamiento pueden ser de gran ayuda los trabajos de campo y otros documentos auxiliares —como la fotografía aérea o la cartografía convencional—, teniendo en la mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse.

Entrenamiento no supervisado: el analista utiliza algún algoritmo que agrupe los distintos vectores de características, en función de sus similitudes internas, a partir de una muestra heterogénea de píxeles. Estos grupos o clusters se consideran representativos de las clases y se

utilizan para calcular los parámetros que las caracterizan. En este segundo caso, las clases obtenidas deben de ser identificadas a posteriori y pueden ser o no del interés del analista.

El método para definir los agrupamientos espectrales se basa en la selección de tres parámetros: 1) variables que intervienen en el análisis; 2) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y 3) criterio para agrupar los casos similares. Las variables son las bandas espectrales seleccionadas para la clasificación, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación. Los casos son los píxeles que componen la imagen, cada uno de ellos definido por tantos ND como bandas intervienen en el análisis. En este espacio multidimensional, se buscarían los grupos de píxeles con ND similares, para luego identificarlos con alguna de las clases informacionales de la leyenda del trabajo.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles, y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento. En cuanto al primer aspecto, se han propuesto diversos criterios para medir la distancia entre píxeles. El más utilizado se basa en la distancia euclidiana:

$$d_{a,b} = \sqrt{\sum_{i=1,m} (\mathrm{ND}_{a,i} - \mathrm{ND}_{b,i})^2} \quad (1)$$

donde $d_{a\,b}$, indica la distancia entre dos píxeles cualquiera a y b; $\mathrm{ND}_{a,i}$, y $\mathrm{ND}_{b,i}$ los niveles digitales de esos píxeles en la banda *i,* y *m* el número de bandas.

También pueden utilizarse otros criterios para medir la distancia entre píxeles, como sería el caso de la distancia media o la de Mahalanobis.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las opciones también son muy numerosas. Uno de los más extendidos es el denominado ISODATA con un mecanismo iterativo bastante sólido.

Por lo tanto, tendríamos dos tipos de categorías o clases:

- **Clases espectrales**: grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen, en función de reflectividad similar, para las bandas y fecha consideradas.
- **Clases informacionales**: clases que constituyen la leyenda del trabajo, establecidas por el propio intérprete.

Idealmente, a cada clase de cobertura le correspondería un único grupo espectral, y que cada grupo espectral corresponda a una sola clase temática. Pero en la realidad pueden producirse las siguientes situaciones:

1. Que una categoría de cubierta esté expresada en varias clases espectrales. Para evitar esta dispersión espectral convendría refinar el muestreo, bien incluyendo en las clases esa heterogeneidad, bien creando subclases, que luego serán agrupadas tras la clasificación en una sola.
2. Otra cosa sería que dos o más categorías informacionales compartan una sola clase espectral, es decir, que algunas categorías de la leyenda no sean discriminables, a partir de la imagen con que se cuenta, sin grave peligro de confusión. La solución más sencilla es optar por una clase más general, evitando descender a un nivel de desagregación mayor. Otras opciones son acudir a imágenes de otras fechas, o bien usar criterios no espectrales en la clasificación.
3. Por último, puede también ocurrir que varias clases informacionales compartan clases espectrales. En este caso convendría replantear la estrategia de trabajo combinando algunas de las soluciones anteriores.

Los entrenamientos supervisado y no supervisado son complementarios el uno del otro, el primero requiere el conocimiento previo del analista para predeterminar el resultado y el último determina la estructura interna de los datos sin ningún tipo de condicionante externo. En resumen, la elección entre uno y otro método dependerá de los datos y medios disponibles y de las propias preferencias personales.

También es posible combinar ambos métodos, ya que si el que el entrenamiento supervisado no necesariamente produce clases espectralmente separables, y el entrenamiento no supervisado puede producir clases que no son del interés para el analista, puede utilizarse un sistema combinado para evitar ambos inconvenientes. En primer lugar se realiza un entrenamiento no supervisado a partir del cual se obtiene una clasificación inicial del área de entrenamiento utilizando las clases espectrales proporcionadas por el algoritmo de clasificación. A continuación el analista evalúa la clasificación con revisiones de campo, fotos aéreas y otros datos de referencia, intentando relacionar éstas con las clases informacionales de la leyenda. Las clases espectrales revisadas (agrupadas, eliminadas o divididas) se utilizan como datos de entrenamiento para el algoritmo de clasificación que es entonces aplicado a la imagen completa.
Tras la fase de entrenamiento, es conveniente contar con medidas de la fiabilidad de los resultados de esta fase, es decir, con un análisis de las estadísticas de entrenamiento. Las técnicas al respecto se revisan en el punto *6. Medidas de la fiabilidad*. Tras este análisis, se

aborda la fase de clasificación propiamente dicha, en la que no deberían producirse resultados muy distintos a los deducidos a partir de este análisis previo.

46.1.2. Fase de clasificación

En esta fase se asigna cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas, en función de los ND del píxel, para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. El resultado será una imagen temáticas, cuyos ND expresen la clase o categoría temática a la que se ha adscrito cada uno de los píxeles de la imagen original.

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son:

- Mínima distancia, por el cual el píxel se asigna a la clase más cercana
- Paralelepípedos, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase
- Máxima probabilidad, en donde el píxel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia.

Frecuentemente se suelen agrupar los dos primeros en métodos no paramétricos, y el último como paramétrico, en razón de si asumen o no que los ND en cada categoría se distribuyen normalmente.

- **Clasificador de mínima distancia**: su criterio para asignar un píxel a una de las clases se basa en incluirlo en la más cercana, es decir, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase, considerando el término distancia en su sentido espectral, comparando los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis. La distancia espectral más empleada, en este sentido, es la distancia euclidiana.

- **Clasificador de paralelepípedos**: el usuario fija un área de dominio para cada clase, según los valores de centralidad y dispersión de la misma. A continuación, un píxel será asignado a dicha clase si sus ND están dentro de ese área de dominio, en todas las bandas consideradas. Este criterio de asignación tiende a delinear unos polígonos multidimensionales de lados paralelos, de ahí su nombre, en torno al centro de cada clase. Resumiendo, un píxel es asignado a una determinada clase si sus ND se encuentran a menos de una determinada distancia del centro de esa clase. Esa distancia se fija por el intérprete, aunque suele

identificarse con la desviación típica, o con un múltiplo suyo, aunque también pueden emplearse otros criterios como la desviación media. Cuanto mayor sea ese umbral, mayor también el número de píxeles incluidos en esa clase, pero también más grande el riesgo de confusiones con clases vecinas.

- **Clasificador de máxima probabilidad**: Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Dicha función aproxima la distribución real de los ND en esa clase, por lo que permite evaluar la probabilidad de que un píxel (con un determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las clase que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo, pero es el más empleado en clasificación multiespectral, por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

Una vez que se culmine la asignación de los píxeles a las clases, se pueden fijar umbrales de probabilidad para cada clase, de tal forma que se rechacen aquellos píxeles con una probabilidad de pertenencia muy baja a cada categoría en estudio. Este proceso, posterior a la clasificación pretender reducir los errores debidos a una mala definición espectral de algunas categorías. Por lo tanto, pueden aparecer en los resultados finales píxeles no clasificados. Si su número es considerable, habrá que revisar la fase de entrenamiento, ya sea para deducir nuevas categorías o mejorar los parámetros de las existentes.

46.2. Clasificación mediante segmentación de objetos

La aparición de satélites civiles de muy alta resolución (< 5m.) ha puesto de manifiesto las deficiencias del enfoque espectrométrico cuando no se cumple la premisa del tamaño. Además, la equiparación de las clases de cobertura terrestre a tipos de materiales homogéneos permite que cualquier parte arbitrariamente delimitada dentro de una región de la imagen siga el concepto definido por su etiqueta o clase. Esta posibilidad es incongruente con el modelo jerárquico del paisaje cada vez más aceptado en Ecología del Paisaje, que asume que la homogeneidad depende de la escala de observación, tanto semántica como biofísica, y que por tanto los paisajes son intrínsecamente heterogéneos y están compuestos de unidades que funcionan simultáneamente como un todo diferente de lo que les rodea y como partes de un todo mayor. Por tanto se hace necesario un nuevo enfoque (orientado a objetos) que sea

compatible con este modelo y en el que las unidades básicas del análisis sean delimitadas de acuerdo a la variación espacial del fenómeno estudiado (Castilla, 2003).

El modelo jerárquico concibe el paisaje como un mosaico de unidades funcionales estructurales anidadas jerárquicamente, de forma que cada unidad se puede considerar compuesta de subunidades que interactúan más entre ellas que con subunidades de unidades vecinas, con lo que cada unidad forma un todo más o menos integrado, esto es, un objeto. A cada nivel superior de la jerarquía le corresponden objetos cada vez mayores: árbol, bosquete o rodal, bosque. Para cada nivel jerárquico se puede establecer un umbral de tamaño (la unidad mínima cartografiable) por debajo del cual se asume que no existen –o no interesan – objetos de ese nivel. Bajo este prisma, cada clase de cubierta es un concepto geográfico que se refiere a una serie de objetos de un nivel específico de esa jerarquía que tienen una estructura y funcionamiento similares (Castilla, 2003).

La estrategia que propone la clasificación por segmentación de objetos es producir, basándose en la estructura espacial de las imágenes, una partición de estas en la que cada región puede considerarse relativamente homogénea y diferente de sus vecinas, y que además supera (aunque no por mucho) el tamaño de la unidad mínima cartografiable. Estas regiones son las unidades básicas de la clasificación, sobre las cuales se pueden definir una serie de atributos espaciales (forma, tamaño, orientación), estructurales (disposición interna, tono, textura y contraste entre las diferentes partes que las componen) y contextuales (relaciones con regiones vecinas) que no son aplicables a píxeles individuales. Cada región se asume corresponde a un agrupamiento que tras la clasificación será agregado junto a otros vecinos en una región mayor que en conjunto pueda verse como una instancia de un cierto tipo de objetos que más tarde son representados en el mapa mediante teselas de una clase particular (Castilla, 2003).

46.3. Clasificación mediante sistemas expertos, redes neuronales, subpixel, análisis textural, fuzzy

Para mejorar los resultados de la clasificación basada en los valores espectrales del píxel, se han desarrollado en los últimos años sistemas más avanzados como reconocimiento de patrones, lógica difusa o *fuzzy*, e ingeniería del conocimiento, que permiten introducir nuevas variables, como el contexto, la textura, etc. en la clasificación.

46.3.1. Sistemas de clasificación expertos y redes neuronales

Los Sistemas de clasificación Expertos proporcionan reglas dirigidas a clasificación de imágenes multiespectrales, incluyendo refinamiento post-clasificación y modelado adicional con herramientas SIG. Se basan en una jerarquía de reglas o árboles de decisión, que describen las condiciones sobre las que un conjunto de información de bajo nivel se abstrae a una clase informacional de alto nivel. Las variables para analizar pueden ser tanto imágenes multiespectrales como datos vectoriales, o también variables texturales, temporales u otra información auxiliar (suelos, MDE, etc.). Estos sistemas simulan el mecanismo de inferencia del cerebro, por lo que el conocimiento puede ser heurístico, basado en la experiencia y en el razonamiento, sin asignar ningún modelo estadístico predeterminado.

Las redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico. Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas.

Entre sus ventajas se incluyen:

- **Aprendizaje Adaptativo**: Capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial.
- **Auto-organización**: Una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje.

El siguiente esquema indica la estructura de una red neuronal:

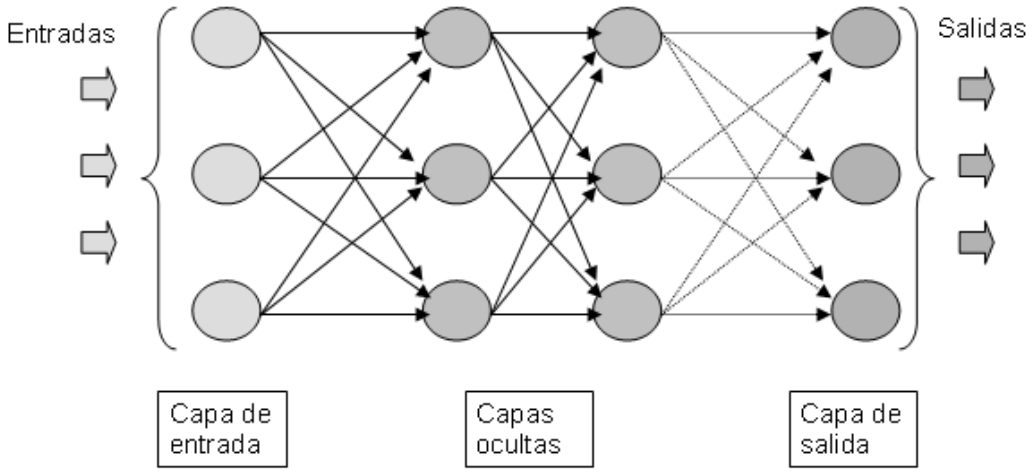


Figura 1. Estructura de una red neuronal

Está constituida por neuronas interconectadas y arregladas en tres o más capas. Los datos ingresan por medio de la "capa de entrada", pasan a través de la "capa oculta" y salen por la "capa de salida". Cabe mencionar que la capa oculta puede estar constituida a su vez por varias capas.

Las principales diferencias entre los clasificadores tradicionales, y los neuronales son:

- En el caso del clasificador tradicional, los patrones de entrada son introducidos secuencialmente, luego se realizan ciertos cálculos internos también secuencialmente. En el caso del clasificador neuronal, las entradas son paralelas y los cálculos internos se realizan paralelamente.
- En el caso tradicional, los parámetros del sistema son calculados previamente a partir de los datos de muestra. Una vez determinados, estos parámetros permanecen invariables en el tiempo. En cambio en el clasificador neuronal los parámetros internos y los "pesos" que unen los nodos (donde se deposita parte del conocimiento acerca del algoritmo de clasificación), son "aprendidos" por la red durante el transcurso de su proceso de aprendizaje, que solo consta de la presentación de las entradas de muestra y de la respuesta esperada por parte de la red. Al terminar este proceso (totalmente automático), puede optarse o no por dejar los parámetros estáticos.

46.3.2. Clasificación sub-píxel

La clasificación espectral tradicional de imágenes multiespectrales buscaba asignar cada píxel a una, y sólo una, de las categorías previamente definidas en la leyenda de trabajo. Con ser este planteamiento el más extendido, puede ser algo limitado para ciertas aplicaciones. La necesidad de categorizar cada píxel de la imagen con una clase exclusiva supone ese píxel homogéneo, es decir, que toda su superficie del píxel está cubierta por la clase a la que se ha asignado. Pero la radiancia proveniente de un píxel, en general, es una mezcla de distintas cubiertas, y al clasificarlo lo asignamos a la cubierta dominante. A efectos de la representación cartográfica convencional, éste es el objetivo habitual, ya que los mapas temáticos asumen que cada unidad cartográfica es homogénea: una misma región o unidad territorial no puede asignarse a dos o más clases de la leyenda de trabajo. Pero realmente existe esa mezcla de categorías o cubiertas en el píxel, sin considerar esa mínima unidad cartografiable a una determinada escala, por lo que en la práctica o bien se opta por simplificar la realidad, prescindiendo de las categorías menos representativas, o bien por generar clases mixtas, en donde la realidad se etiqueta considerando esa mezcla de componentes. Las clases de cobertura de suelo 'mosaico de cultivos' o 'matorral arbolado' son ejemplos muy extendidos de esta situación.

Una alternativa a ambos planteamientos es emplear técnicas que permitan extraer información sobre el grado de mezcla presente en cada píxel, esto es, obtener imágenes que nos indiquen la proporción de cada categoría de interés en un píxel, asumiendo que la respuesta recibida por el sensor es, de alguna forma, una combinación de signaturas espectrales puras. La obtención de estos componentes sub-píxel no es una tarea reciente en teledetección, con propuestas de gran interés desde los años setenta, aunque ha sido a partir de los noventa cuando se extendió su uso, gracias al uso masivo de imágenes de baja resolución espacial, como las proporcionadas por el AVHRR, en donde es especialmente crítico obtener información sobre la mezcla en el interior de un píxel.

46.3.3. Análisis textural

La Textura es una variable visual que indica la variabilidad espacial de los tonos encontrada en una parte de la imagen. En términos visuales expresa la rugosidad o la suavidad creada por la variación del tono o por la repetición de un cierto patrón a través de la superficie. Relacionada con la textura está también el contexto, que considera las relaciones espaciales entre los píxeles de la imagen. Por tanto, se trata de variables que miden la estructura espacial de la imagen.

Los métodos para introducir la textura y el contexto espacial en la interpretación digital pueden agruparse en función de la fase de la clasificación en la que intervienen. Así, podemos distinguir entre aquellos que generan bandas texturales previas a la clasificación, los que emplean usan textura y contexto durante la clasificación y los que los consideran tras de la asignación, para refinar los resultados. Estas medidas de textura y contexto se han desarrollado especialmente en el campo de las aplicaciones urbanas, ya que la clasificación de estas zonas resulta muy problemática por la gran variedad espectral de las superficies que las componen.

Técnicas para medir la textura espacial en una imagen: el objetivo de estas técnicas es medir la textura o contraste espacial entre los píxeles que componen la imagen. Si en términos de interpretación visual, la textura hace referencia a la diversidad espacial de los ND en una imagen, los índices numéricos de textura se dirigen a medir ese contraste en la vecindad de los ND de la imagen. Algunos de estos índices operan sobre toda la imagen y proporcionan una sola medida del contraste, mientras otros calculan la textura local, normalmente comparando el ND de un píxel con el de los que le circundan. Los primeros son útiles para comparar la complejidad espacial de distintas zonas, o para analizar la evolución en el tiempo de un determinado sector; los segundos permiten generar imágenes de textura espacial, sirviendo también como variable auxiliar para clasificaciones temáticas.

Los índices texturales más empleados aplicables al conjunto de toda la imagen son:

- Desviación típica (DT) a lo largo de perfiles que atraviesen uno o varios transectos de la imagen: este método considera que la DT del conjunto de la imagen no resulta apropiada para medir el contraste espacial de la imagen, ya que no mide realmente el contraste espacial sino más bien el tonal (anchura del histograma).
- Dimensión fractal: en el contexto del análisis de imágenes, la dimensión fractal puede facilitar una valoración numérica del grado de complejidad espacial de una determinada escena. Al tratarse de una superficie, una imagen tendrá una dimensión fractal entre 2 y 3, aproximándose más a 3 cuanto mayor heterogeneidad espacial presente.
- Auto-correlación espacial: asume la los rasgos de la cubierta terrestre se parecen más entre sí cuanto más cerca están, ya que en el paisaje son poco comunes los cambios bruscos. La medida de esta asociación espacial puede obtenerse a partir de índices que miden la correlación que existe entre cada píxel y sus vecinos.
- Semivariograma: basado sobre el mismo concepto de auto-correlación espacial, puede obtenerse un gráfico que muestre cómo se modifica la varianza espacial con la distancia, lo que permite tener una idea bastante precisa de la variación espacial de una imagen.

Además de estos índices que evalúan la textura global de la imagen, también exsiten otro métodos que permiten generar imágenes de textura, analizando la heterogeneidad espacial en las inmediaciones de cada píxel, basados en ventanas móviles, más o menos grandes según la distancia de vecindad considerada. Entre estos cabe mencionar:

- Desviación típica local: se calcula como la dispersión de los ND de una ventana de píxeles en relación con su promedio.
- Diferencias absolutas entre los ND máximos y mínimos de la ventana considerada
- Entropía: relación entre la frecuencia de un determinado ND y la frecuencia máxima esperable en la ventana de píxeles considerada

46.3.4. Clasificación borrosa (Fuzzy)

La mayor parte de variables ambientales implican la consideración de cada píxel como un compuesto de varios elementos, si se considera el espacio como un continuo, sin barreras muy precisas. Como ya se comentó en la clasificación sub-píxel, este es un enfoque rígido, ya que no es lo mismo considerar que un píxel tiene un 99% de probabilidad de pertenecer a una clase A y un 1% a otra B, que cuando dicho píxel tiene un 55% de probabilidad de pertenecer a una clase A y un 45% a la otra B.

Frente a esta clasificación "rígida" a una clase, se considera una pertenencia "borrosa" cuando se admite un cierto grado de pertenencia. Cada píxel se etiqueta en varias categorías, con grado de pertenencia según su similitud espectral. En la clasificación tradicional la función de pertenencia correspondería a una distribución binaria (0 no pertenece, 1 pertenece), pero puede concebirse un función de pertenencia con valores comprendidos entre 0 y 1, lo que permitiría una asignación simultánea a varias categorías, con diferentes grados de pertenencia.

Las aplicaciones de esta lógica borrosa son de especial interés cuando se pretenda analizar coberturas terrestres con alto grado de heterogeneidad, como es el caso de las categorías urbanas o en inventarios de vegetación.

46.4. Análisis de resultados

Independientemente del método empleado en la clasificación, el resultado es una nueva imagen, similar a las originales, en cuanto a estructura y tamaño, pero con la importante diferencia de que el ND de cada píxel no corresponde a un valor de reflectividad, sino a la clase de la leyenda

de trabajo a la que se asignó durante la clasificación, es decir, una matriz numérica, similar a la de la imagen original, aunque de dos dimensiones, pues se ha condensado la información espectral (varias bandas) en una sola clase temática. Esa nueva imagen puede ser el producto final del trabajo, o servir como estadio intermedio en un proyecto cartográfico o medioambiental más amplio, en donde la teledetección se combine con otro tipo de variables espaciales.

Es necesario un estudio detallado de cada tipo de signatura para decidir qué tipo de clasificación es la más adecuada para su análisis (paramétrica – no paramétrica). Las clases informacionales (leyenda) influyen mucho en los resultados de la clasificación; clases como 'Mosaico de cultivos' presentan heterogeneidades tanto espectrales como de contenido. Se requiere un conocimiento detallado de las cubiertas incluidas en las clases, y sus respuestas espectrales.

La imagen temática resultante podrá dar lugar a dos tipos de productos: cartográficos y estadísticos. En el primer caso se trata de convertir la imagen clasificada en un mapa temático; en el segundo, de realizar un inventario estadístico a partir de los ND que componen esa imagen.

Para su uso como mapa temático, una vez georreferenciada correctamente, la imagen clasificada requiere una serie de elementos gráficos, que faciliten su lectura. El fundamental será una tabla de color apropiada al significado temático de cada una de las clases, por lo que es preferible respetar las convenciones establecidas en la asignación temática de colores: por ejemplo, rojo para las zonas urbanas, verde para las forestales, ocre para las agrícolas, etc. De esta forma, para diseñar un color apropiado a cada categoría basta indicar tres valores numéricos, entre 0 y 255, que expresen el nivel RGB asignado a dicha clase. En clasificaciones temáticas será recomendable considerar un máximo de quince o veinte colores, bien discriminables entre sí, para visualizar el resultado. Un mayor número de categorías complicaría la interpretación visual del mapa temático final.

En cuanto a su uso como inventario estadístico, basta evaluar el número de píxeles incluidos en cada una de las categorías, ya que al ser conocida la dimensión superficial de cada píxel, resulta inmediato obtener la extensión ocupada por cada categoría. El tratamiento digital permite calcular superficies sobre toda la imagen, o sobre zonas identificadas geográficamente con polígonos determinados. Si esos polígonos son evaluados procesándolos con unidades administrativas (municipios, provincias, etc.), puede obtenerse un inventario de gran interés para las estadísticas oficiales.

46.5. Fuentes de error

Los posibles errores que pueden cometerse en el proceso de clasificación pueden ser:

- No clasificar un píxel en la clase a que corresponde (Omisión)
- Clasificar un píxel en una clase a la que no corresponde (Comisión)

Estos errores se pueden expresar en la **Matriz de Confusión**. En dicha matriz, las filas representan las clases del mapa temático y las columnas las clases reales presentes en la imagen.

	caducifolias	coníferas	urbano	matorral	**suma filas**
caducifolias	65	4	22	24	**115**
coníferas	6	81	5	8	**100**
urbano	0	11	85	19	**115**
matorral	4	7	3	90	**104**
suma colum.	**75**	**103**	**115**	**141**	**434**

Tabla 1. Ejemplo de matriz de Confusión

- **Error de comisión**: si se divide la suma por filas de los elementos fuera de la diagonal principal o residuos, entre el número total de elementos de la fila, se obtendrá el error de comisión. Se trata del porcentaje de píxeles que habiendo sido asignados a una clase no corresponden en realidad a ella. También se denomina riesgo del usuario, o probabilidad de error que tiene el usuario cuando asume que un cierto píxel pertenece a una clase cuando en realidad pertenece a otra.

$$Ec_i = \frac{\sum_j x_{ij} - x_{ii}}{\sum_j x_{ij}} \quad (2)$$

- **Error de omisión**: dividiendo la suma por columnas de los residuos, entre el número total de elementos de la columna se obtiene el error de omisión o riesgo del productor. Es el porcentaje de píxeles que perteneciendo en realidad a una clase no han sido asignados a ella. Se puede considerar como el error que comete el analista al no incluir algunos píxeles en su clase correspondiente.

$$Eo_j = \frac{\sum_i x_{ij} - x_{jj}}{\sum_i x_{ij}} \quad (3)$$

46.6. Medidas de la fiabilidad

Independientemente del método empleado en definir la fase de entrenamiento, antes de abordar la fase de clasificación propiamente dicha hay que evaluar la separabilidad real de las clases identificadas en la fase de entrenamiento, o sea, evaluar la viabilidad de que esas categorías puedan clasificarse sin grave riesgo de error. Si se comprueba que dos o más son muy similares, sería muy probable que haya confusión entre ellas, por lo que se podría optar por:

- Confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido correctamente deducidas.
- Adoptar una leyenda más general, con nuevas categorías que supongan una mezcla de las que ofrecen mayor riesgo de confusión.
- Recabar información auxiliar o imágenes de otras fechas.

Existen varios métodos, gráficos y numéricos, para evaluar las estadísticas de entrenamiento:

- Entre los gráficos, el más elemental es un diagrama de signaturas, donde figuran, en abscisas, las bandas que intervienen en el análisis, mientras en ordena-das los ND medios de cada categoría.
- Otro método gráfico consiste en realizar un histograma de frecuencias de los ND que componen la muestra (los píxeles de las áreas de entrenamiento). Para representar esta distribución de frecuencias se asume como hipótesis que los ND en el seno de cada categoría se distribuyen normalmente, lo que permite estimar su distribución, a partir de conocer su media y desviación típica.
- Un método no gráfico sencillo consiste en calcular la distancia normalizada entre dos clases, calculada como la diferencia absoluta entre las medias de dichas clases, en proporción a la suma de sus desviaciones típicas. Este cálculo se aplica a cada par de bandas que intervienen en la clasificación, promediándose su valor para obtener una matriz de separabilidad.
- La divergencia estadística es un poco más compleja, y también más versátil. Considera como hipótesis que los ND en cada clase se distribuyen normalmente, considerando la separabilidad como medida del solape entre clases vecinas. Se trata por tanto de calcular ese valor para tantas variables como bandas intervienen en el proceso de clasificación, para a continuación considerar el vector de medias y la matriz de varianza-covarianza entre pares de categorías.

El análisis de las estadísticas de entrenamiento es necesario para evaluar la conveniencia de la leyenda empleada, el tipo de información disponible, o el método de clasificación empleado.

46.7. Técnicas de revisión por muestreo

Para revisar el error cometido durante la clasificación, un proceso de verificación completo supondría la verificación de la pertenencia píxel por píxel de la imagen original a la clase asignada, lo cual o bien es imposible, o económicamente hace inviable y sin sentido el proceso de clasificación. Por ello, se usarán un cierto número de áreas de muestreo suficientemente representativo, con el fin de estimar la precisión de la clasificación. Ésta se calcula para cada una de las clases se estima dividiendo el número de píxeles de la zonas de muestra correctamente clasificados por el número total de píxeles para el área de muestra en cada clase. La pertenencia o no a la clases correcta en cada caso, en cada área de muestreo, deberá ser determinada mediante información ajena a la propia clasificación, tal como información de campo o de fotografías aéreas.

El proceso de revisión o verificación de los resultados tiene las siguientes etapas:

- Diseño del muestreo (nº de muestras, método de selección)
- Recopilación de información de referencia (fuentes de verdad-terreno)
- Comparación de la información de referencia sobre los resultados mediante test estadísticos y generación de la matriz de confusión.
- Análisis de los errores hallados, validación estadística de la calidad del proceso de clasificación, y cuantificación de la fiabilidad de las metodologías empleadas.

Las áreas de muestreo para las medidas de fiabilidad pueden ser:

- Áreas de entrenamiento de una clasificación supervisada.
- Zonas de muestra homogéneas especificadas por el analista.
- Zonas o píxeles elegidos aleatoriamente.

Si se opta por la primera posibilidad, se puede producir una estimación demasiado optimista y con resultados, aunque es una opción muy utilizada, ya que ofrece una gran comodidad y ahorro de recursos respecto a los otros.

En el segundo caso, y durante la fase de entrenamiento, el analista puede situar las zonas de muestreo que serán utilizadas en el análisis del error. En esta opción también puede existir un cierto sesgo en la precisión estimada, ya que tanto las áreas de entrenamiento como las de muestreo se eligen a partir de la misma información de base.

El último de los métodos es el que produce resultados menos sesgados, al tratarse de un muestreo aleatorio. Es aconsejable identificar grupos de píxeles más que píxeles aislados debido a la dificultad práctica de situar con precisión un píxel concreto posteriormente en las fotografías aéreas o en trabajo de campo.

De una manera u otra hay que definir una malla o trama de muestreo, con intervalos regulares o irregulares, sobre la escena clasificada, con la que se eligen en la mayoría de las ocasiones de manera aleatoria, áreas de muestreo, cada una de ellas conteniendo varios píxeles. Los tipos de muestreo pueden ser:

- Aleatorio simple
- Aleatorio estratificado (dividiendo la población según una variable auxiliar, como por ejemplo la altura, o las propias categorías consideradas).
- Sistemático: muestra distribuida con intervalos regulares a partir de un punto origen.
- Sistemático no alineados, que se basa en el anterior, pero dejando fija una coordenada (fila o columna) variando la otra, aleatoriamente.
- Por conglomerados, seleccionando grupos de puntos vecinos a cada píxel elegido aleatoriamente, o conglomerados, según un esquema prefijado.

46.8. Análisis estadístico de la matriz de confusión

A partir de la comparación de los resultados en las zonas de muestreo con la verdad terreno, podemos analizar los errores cometidos, ya sea mediante algún estadístico continuo (error medio cuadrático normalmente), o bien analizar la matriz de confusión. Estos errores pueden deberse a las siguientes causas:

- Limitaciones del sensor que produjo la imagen (espacial, radiométrica, espectral, etc.)
- Metodología empleada para la extracción de información temática por clasificación de la imagen, que pueden ir desde impericia del analista a elección incorrecta de la fecha de adquisición de la imagen.
- Estructura del territorio, cuya morfología y heterogeneidad influirá decisivamente en la clasificación, y condiciones climáticas y biofísicas de la cobertura terrestre en la zona analizada (orientación, pendiente, estados fenológico, etc.).
- Proceso de verificación (subjetividad en la elección de verdad terreno por distintos fotointerpretes, georreferenciación u otras características de las imágenes consideradas como verdad terreno, etc.).

La matriz de confusión, definida previamente, permite plasmar los conflictos entre las clases resultado de la clasificación frente a las obtenidas de la verdad terreno. A partir de estos datos,

mucho más exhaustivos que el análisis realizado en la fase de entrenamiento, pueden deducirse nuevos métodos de clasificación, empleo de análisis multitemporal, simplificación de la leyenda, etc.

La matriz de confusión nos proporciona toda una serie de medidas estadísticas para validar los resultados de las distintas técnicas de clasificación. La más simple consiste en calcular la fiabilidad total $\hat{F}$ del mapa relacionando los elementos de la diagonal principal de dicha matriz con el total de puntos muestreados.

$$\hat{F} = \frac{\Sigma_{i=1,n} x_{ii}}{\Sigma_{i=1,n} \Sigma_{j=1,n} x_{ij}} \quad (4)$$

A partir de este valor puede calcularse el intervalo de confianza donde se situará la fiabilidad real F alcanzada en la clasificación.

$$F = \hat{F} \pm z^{*}ES \quad (5)$$

El error de muestreo ES para estas validaciones puede generarse a partir de la fórmula del muestreo aleatorio simple, donde n indica el nº de categorías o clases, p el porcentaje estimado de aciertos, y q el de errores.

$$ES = \sqrt{\frac{pq}{n}} \quad (6)$$

Bibliografía

[1] Pinilla, C. Elementos de teledetección. Editorial RA-MA. 1995.

[2] Chuvieco, E. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, 2002.

[3] Castilla, G. Object-oriented analysis of Remote Sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification. Unpublished Ph.D. Thesis. Polythecnic University of Madrid, 2003. Pag. XVI – XVIII.

[4] Cochran, W. G., Sampling Techniques, 3rd Edition. John Wiley & Sons, 1977.

[5] Mann, S., Intelligent Image Processing. John Wiley & Sons, 2002.

Tema 47. Teledetección por Radar: Principios. Sistema radar de apertura sintética. Resoluciones. Obtención de imágenes. Sensores y plataformas más utilizados. Técnicas de tratamiento. Aplicaciones. Interferometría. Obtención de Modelos de Elevaciones de imagen radar mediante INSAR. Estudios de subsidencias.

47.1. Teledetección por Radar: principios

Los sistemas de adquisición en teledetección pueden ser pasivos o activos. Los primeros son únicamente receptores que recogen la energía procedente de una superficie. Los sensores activos emiten energía electromagnética y recogen la respuesta a esa emisión después de la interacción con la superficie.

El radar (*radio detection and ranging*) es un sistema activo que trabaja en el rango de longitudes de onda comprendido entre 1mm y 1m, es decir, en el espectro de las microondas. Un sistema radar consta, en líneas generales, de un mecanismo que genera pulsos electromagnéticos que controlan tanto el sistema de emisión como el de recepción. La misma antena que emite los pulsos recoge la respuesta y el retraso de tiempo entre el pulso emitido y el recibido sirve para calcular la distancia al objeto observado.

El sistema radar suele emplear la técnica de observación lateral en lugar de la observación nadiral como lo hacen la mayoría de los sensores aerotransportados.

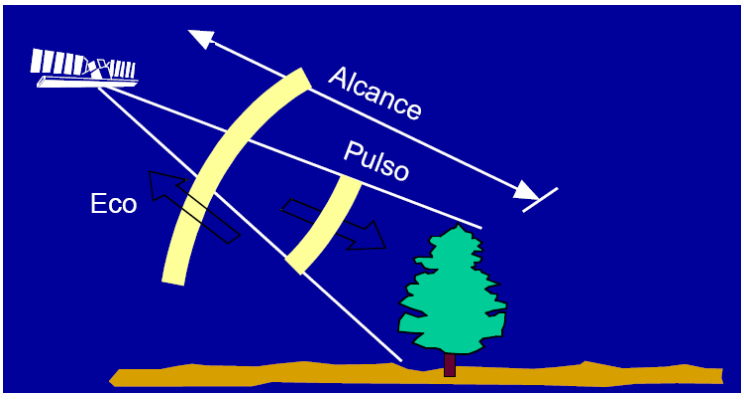


Figura 1. Sistema Radar .Fuente: GlobeSAR

Una de las características más importantes del rango de longitudes de onda que utiliza es que prácticamente no tiene bandas de absorción del agua, es una región del espectro muy limpia a

interferencias atmosféricas provocadas por el elevado contenido en agua de la atmósfera, como ocurre en las zonas tropicales.

Algunas de las ventajas que ofrecen este tipo de sistemas frente a los de observación en el dominio óptico son por ejemplo, que permiten observar también por la noche, que puede observar la superficie terrestre incluso con nubes y que tienen la capacidad de observar la rugosidad de la superficie.

El funcionamiento de un sistema radar es el siguiente: la antena ilumina una zona de la superficie terrestre en una configuración de visión lateral (esto es necesario para evitar ambigüedades entre puntos simétricos respecto al nadir). Durante su recorrido sobre la órbita, el sensor barre una franja continua de terreno de anchura S (del inglés *swath*):

$$S = \frac{\beta H}{\cos^2 \theta} = \frac{\lambda H}{W \cos^2 \theta} \quad (1)$$

donde β es el ángulo de apertura de la antena en la dirección perpendicular a la traza de la plataforma radar (en radianes), W es la altura del panel de la antena y θ es el ángulo de visión (separación angular entre el centro de la franja observada y el nadir del sensor), λ es la longitud de onda empleada y H la altura orbital.

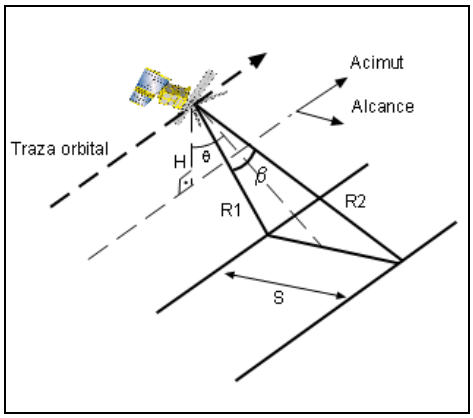


Figura 2. Geometría de la imagen radar

Por ejemplo, vamos a calcular el ancho de barrido para la siguiente configuración: λ= 15cm, H=700km, θ=20º y W= 2m. El resultado para el ancho de barrido S es de 60 km.

La resolución de un sistema radar se determina por la resolución en alcance (mínimo R1 y máximo R2, ver Figura 2) y por la resolución en acimut, que es esta última la que define la distancia mínima discriminable por el sistema entre dos puntos situados en una línea paralela a la traza del sensor.

Las antenas de radar concentran la energía en la dirección del blanco, recogen su eco e indican la posición angular del punto observado. La resolución de los sensores dependerá del ancho de banda y de la duración del pulso para determinar la mínima distancia a la que deben estar dos objetos para que se puedan discriminar el uno del otro.

La capacidad de un pulso para detectar un objeto depende de su energía y por lo tanto cuanto más largo es el pulso mayor es la energía y mayor la capacidad de detección pero esto repercute en una disminución del ancho de banda y por lo tanto de la resolución espectral. Para llegar a un acuerdo entre ambos parámetros, duración del pulso y ancho de banda, es necesario modular el pulso; se suelen emplear las técnicas de modulación lineal de frecuencia y modulación de fase.
Los sistemas radar de más interés para la teledetección son los que pueden generar imágenes, suelen ser clasificados en radares de apertura real y de apertura sintética en función de la forma que empleen en la antena. Los radares de apertura real no se suelen utilizar sobre plataformas orbitales debido a que la resolución del sensor depende directamente de la altura de observación y de la longitud de la antena por lo que no es posible obtener una alta resolución espacial a esas distancias de la superficie quedando estos sistemas destinados a la observación a bordo de aviones, como por ejemplo para determinar altitudes.

El radar de apertura sintética implementa un método de observación que simula una longitud de antena muy larga por lo que la resolución final de la imagen procesada puede alcanzar resoluciones espaciales buenas, en el rango de 3 a 10 metros.

En cuanto a selección de la frecuencia radar a utilizar, la longitud de onda se selecciona en función de la escala del fenómeno o de las características que se desean identificar. Por ejemplo, la banda de 2,4 a 3,75 cm se utiliza para la detección del hielo o, para penetrar a través del contenido en agua es mejor las longitudes de onda más largas, por el contrario, para penetrar en la vegetación es mejor longitudes de onda más cortas en el espectro de las microondas.

En la emisión de la onda radar también juega un papel importante la polarización de la onda, las antenas de los sistemas radar se pueden configurar para transmitir y recibir radiación polarizada, de forma que si se emite una onda polarizada en una dirección concreta y se recibe de forma que varia la dirección de polarización, esto puede estar indicando características de la superficie. Es una aplicación de inferencia de tipo de superficies.

La ganancia de una antena radar es la relación entra la energía que radia en una dirección y la que proporcionaría una antena que radiaría de forma uniforme en todas las direcciones. La ganancia de una antena representa la distribución de la energía, se dice que la antena enfoca la

radiación electromagnética cuando el campo electromagnético generado en cada punto de la antena se combina de forma coherente y las señales recibidas corresponden a la suma en fase de los pulsos emitidos.

De esta forma, la ecuación radar relaciona la potencia recibida por la antena y la potencia transmitida en función de la ganancia transmitida y de las dimensiones de la antena:

$$P_{rec} = P_{trans} \frac{G^2 \lambda^2 \Delta\sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2)$$

donde P_{trans} es la potencia pico transmitida en una señal, G es la ganancia máxima de la antena transmisora, $\Delta\sigma$ es el área radar correspondiente a la huella del haz y $r = H/\cos\theta$.

Hay que tener en cuenta que como en todo sistema electrónico señal final estará afectada de por un nivel determinado de ruido cuya fuente principal va a ser de naturaleza térmica, introducido en el sensor por el hecho de que tanto la antena como la superficie observada están a unas temperaturas distintas del cero absoluto.

47.2. Sistema radar de apertura sintética

Aunque aún no se ha tratado más en detalle la resolución de un sistema radar, sabemos que la capacidad para distinguir dos objetos cercanos viene definida por la resolución en el acimut, es decir, en la dirección de la traza del sensor (Figura 2). Utilizando un sistema radar de apertura real con una configuración típica de longitud de antena, ángulo de apertura y en función de la longitud de onda pueden llegarse a obtener resoluciones de 1 km, valor que es poco aceptable para la formación de imágenes. Si dejamos fija la longitud de onda y variamos la longitud de la antena, necesitaríamos una antena de casi 400 metros de longitud para alcanzar una resolución acimutal de 30 metros.

El principio del radar de apertura sintética (en inglés denominado SAR, *Synthetic Aperture Radar*) está basado en que un objeto permanece durante un cierto intervalo de tiempo bajo la iluminación del haz radar y durante este tiempo puede ser observado desde diferentes posiciones a lo largo de la trayectoria del sensor.

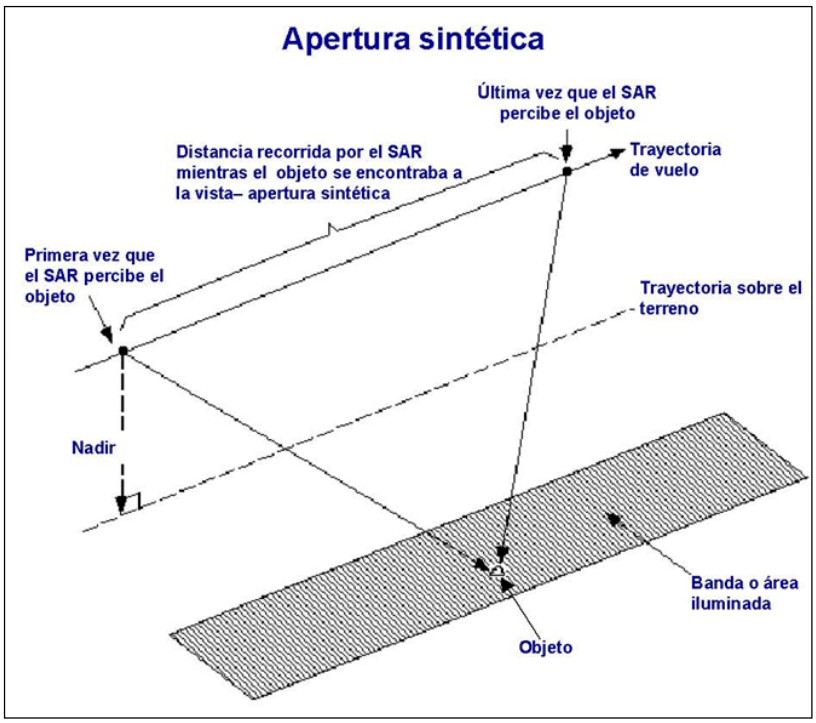


Figura 3. Concepto de Radar de Apertura Sintética . Fuente: GlobeSAR

La distancia que recorre mientras que el objeto es observado desde diferentes direcciones viene a ser la longitud de la antena con que ha sido observado el objeto, es decir, se forma una antena virtual. Posteriormente en el procesado de la imagen se enfocan todas las observaciones del mismo punto para obtener resoluciones menores de 10 metros.

La imagen que se forma con el sistema SAR contiene valores complejos y es bidimensional; se forma con la distancia al sensor (alcance) y la distancia a lo largo de la trayectoria (acimut).

Un sistema SAR consta de los siguientes elementos principales:

- Antena
- Transmisor / Receptor
- Procesador de la imagen
- Sistemas de control instrumental

El fundamento de la técnica del SAR se explica a partir de dos procedimientos: el concepto de síntesis de la apertura de antena y la aproximación de la síntesis Doppler.

La apertura real de la antena SAR es el intervalo de distancia a lo largo de la dirección del alcance (equivalente al ancho del puso transmitido) a partir del cual todas las señales regresan a la antena en un mismo instante.

La huella iluminada por el haz es:

$$(3)\quad F = \frac{2\lambda H}{L}$$

donde L es la longitud de la antena.

Debido al movimiento del sensor, vamos obteniendo sucesivos ecos de un mismo punto de la superficie a diferentes distancias y por lo tanto la señal se irá desfasando con respecto a la primera. En el procesador cada una de estas señales se regenera para formar una señal coherente del punto observado. Esto equivale a una observación con una antena real de apertura *F*, que es el tamaño máximo para la cadena sintetizada de energía recogida del punto observado.

A diferencia con los radares de apertura real, con el SAR podemos alcanzar mayor resolución con menor tamaño de antena instrumental y aumentando la altura del sensor, ya que de esta manera el tamaño de la huella iluminada será mayor sobre la superficie y por lo tanto también lo va a ser la longitud de la cadena sintetizada.

El tamaño máximo para la cadena sintetizada es *F* y el tamaño del haz tendrá la capacidad de observar una huella en la superficie de:

$$(4)\quad X = \frac{L}{2}$$

Por otro lado, en el movimiento del satélite a lo largo de su órbita se produce un desplazamiento de la señal recibida por un efecto Doppler, que será positivo y decreciente a medida que el sensor se acerca a la vertical del punto observado y negativo a partir de ese momento. Si consideramos un punto P' sobre la línea acimutal separado del punto observado una distancia X, la señal procedente de P' tendrá una demora en el tiempo de $t = X/v$. Entonces el menor intervalo de tiempo que podrá ser medido en una determinada banda $B=2f_D$ ($f_D=v/L$, *es la frecuencia Doppler*) será:

$$(5)\quad t_{mín} = \frac{1}{B} = \ldots = \frac{L}{2v}$$

donde llegamos a la misma expresión que la mostrada a partir de la cadena sintetizada para determinar la mejor resolución posible o lo que es lo mismo, el tamaño de la huella del haz radar:

$$(6)\quad X = vt_{mín} = \frac{L}{2}$$

Se consideran dos formas de medición de tiempos en radar, por un lado la medida del retraso del eco recibido y por otro se utiliza la fase. Las técnicas más precisas emplean radares coherentes, que son capaces de medir la fase controlando: el pulso emitido en fase y tiempo, la frecuencia

del oscilador coherente, que demodula la señal cuando es recibida por el sensor y controlando el movimiento de la plataforma compensándolo. La diferencia en la precisión de la medida de tiempos a partir de retrasos o medir a partir de la fase es de cuatro órdenes de magnitud, del orden de 10 metros en la medida del retraso y del milímetro en la medida de fase, si bien este último tipo de medida es relativa.

Una vez transmitido el pulso y recibido su eco, la señal que llega es demodulada y almacenada en las dos dimensiones, por un lado se almacenan los tiempos asociados al acimut y por otro los tiempos asociados al alcance, estas señales pasarán al sistema procesador para correlar y combinar la información obtenida de cada punto y formar la imagen.

47.3. Resoluciones

La resolución del sensor tiene dos dimensiones, una en distancia o en alcance (*range resolution*), que se define como la mínima distancia detectable entre dos puntos de la superficie en la dirección ortogonal a la trayectoria del sensor. La segunda dimensión es el acimut que hace referencia también a la mínima distancia detectable entre dos puntos, pero en este caso en la misma dirección de la trayectoria del sensor.

En la Figura 2 vemos gráficamente la definición del alcance por la representación de las distancias R1 y R2 que corresponden con las distancias mínima y máxima de interacción del haz radar con la superficie terrestre (supuesta plana).

La resolución en la dirección del alcance se determina por las características del radar y las del procesador. Esta resolución depende de la longitud del pulso transmitido (pulsos cortos mejoran la resolución). Si consideramos dos puntos a una distancia X_r situados en la dirección del alcance, sus ecos respectivos diferirán un tiempo Δt:

$$\Delta t = \frac{2X_r}{c} sen\theta \quad (7)$$

Como la resolución del sensor depende del ancho de banda y la duración del pulso de la forma $B = \frac{1}{\tau}$, donde $\tau = 1/B$ es la duración mínima del pulso, entonces $\frac{2X_r}{c} sen\theta = \tau$ y por lo tanto:

$$X_r = \frac{c\tau}{2sen\theta} = \frac{c}{2Bsen\theta} \quad (8)$$

que es la expresión para la resolución en la dirección del alcance.

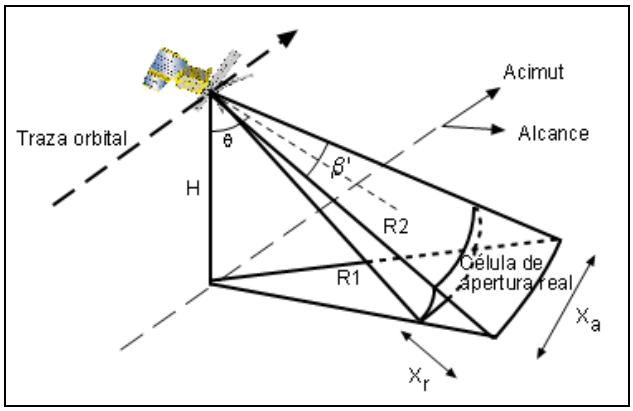


Figura 4. Resolución en alcance (X_r) y resolución en acimut (X_a)

Por ejemplo, para un ancho de banda de 14,6 Mz emitida con un ángulo θ de 20º, la resolución será de 30 metros. Si aumentamos el ancho a 27 Mz, la resolución llega a los 16 metros.

La resolución en la dirección del acimut se determina por el ancho angular del haz, entonces para que dos objetos cercanos situados a lo largo de una dirección paralela a la traza puedan ser detectados, deben estar separados una distancia mayor al ancho del haz en el terreno. En un radar convencional de apertura real, la resolución en la dirección del acimut se determina en función del ancho del haz en esa dirección, también llamado huella, ya que los ecos procedentes de puntos situados sobre una línea acimutal alcanzan al receptor en el mismo instante de tiempo y por lo tanto son imposibles de distinguir.

La expresión para la resolución acimutal:

$$(9)\quad X_a = \frac{\beta' H}{\cos\theta} = \frac{\lambda H}{L\cos\theta}$$

donde β' es el ángulo de apertura de la antena en la dirección acimutal y L es la longitud de la antena, el resto de parámetros ya son conocidos.

Si utilizamos los valores λ= 15cm, H=700km, θ=20º y $L=11\ m$, la resolución acimutal es de 10 km. Si reducimos la longitud de onda a 1,5 cm la resolución será de 1km. Con esta misma longitud de onda necesitaríamos una antena de casi 400 metros para lograr una resolución de 30 metros, por esta razón se utilizan los sistemas SAR, que permiten utilizar antenas instrumentales pequeñas y en el procesado de la señal simular longitudes muy largas.

Hemos visto que la resolución se estudia en dos dimensiones, el área del rectángulo que vemos en la Figura 4 formada por la interferencia del frente de onda con la superficie en función del ángulo de incidencia con la superficie (θ) se denomina célula de resolución o de apertura real.

47.4. Obtención de imágenes

Cuando el haz radar pasa por un punto recoge la energía reflejada y se almacena en función del tiempo como una fase (función de la distancia del alcance y en la dirección del acimut). La siguiente figura muestra la configuración esquemática de adquisición de datos:

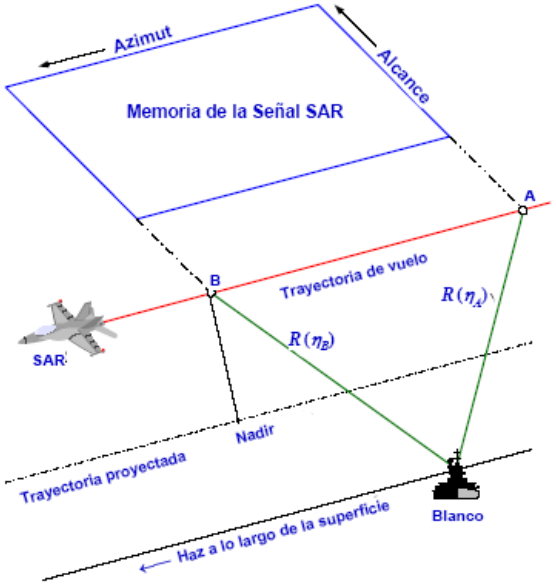


Figura 5. Adquisición de datos radar. Fuente: GlobeSAR

Cuando se recoge el eco de cada pulso emitido y reflejado por el punto observado se graba una línea en la memoria de la señal SAR, esta línea corresponde a un tiempo constante asociado al acimut. Al moverse la plataforma (o el punto observado) varía en la dirección del alcance y se graba en la siguiente línea. En la siguiente figura podemos ver una representación de los datos recibidos en la memoria de la señal SAR:

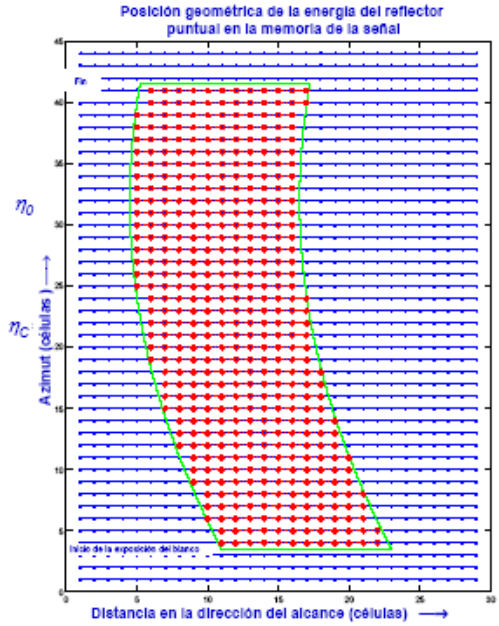


Figura 6. Datos recibidos (en rojo) en la memoria de la señal SAR. Fuente: GlobeSAR

En esta figura representa la geometría de la energía recibida de un objeto puntual en la memoria del SAR, donde tenemos: el eje de abscisas que representa la distancia del alcance, el eje de ordenadas que muestra las líneas de variación de acimut. Ambos valores se representan de forma constante: intervalos entre marcas de distancia para el alcance e intervalos constantes para las líneas de acimut, esto corresponde a los valores de resolución vistos en el apartado anterior.

El propósito del procesamiento de la señal SAR será comprimir esta energía de forma coherente, representada en el espacio bidimensional por los puntos rojos de la Figura 6 en un solo punto para asegurar la resolución de potencia del instrumento.

De esta forma, la señal que llega al sensor y que es almacenada y procesada, es la mezcla de los ecos procedentes de muchos objetos puntuales, cada celdilla de la imagen a formar estará caracterizada por una respuesta diferente de manera que si se relaciona esta señal con una respuesta de referencia para un pixel, la correlación será máxima cuando el eco corresponde a la celdilla en cuestión y ese grado de correlación irá decreciendo para ecos procedentes de otras celdillas.

El procesado se realiza en el sistema natural de coordenadas del radar, en el plano asociado al alcance. Una imagen radar en la superficie terrestre representa las distancias del alcance

constante proyectadas en forma de alturas sobre dicha superficie en cada punto. Esta superficie se suele tomar como un modelo elipsoidal del nivel medio del mar.

47.5. Sensores y plataformas más utilizados

Los radares de apertura sintética son uno de los sensores radar que más interés han mostrado en los últimos tiempos ya que presenta ventajas tales como la independencia de las condiciones atmosféricas y de la iluminación solar, factores muy críticos con los sensores que trabajan en el dominio óptico.

Además de los radares formadores de imágenes, como el sistema SAR, se han desarrollado también sensores como los dispersores que miden reflectancia direccional o los radares altímetros utilizados para levantar perfiles topográficos.

A continuación se presentan los sistemas SAR antiguos y los actuales:

Satélite\ Tipo de información	Seasat	SIR-A	SIR-B	Almaz	SIR-C/X SAR	ERS-1	JERS-1
País	E.U.	E.U.	E.U.	U.R.S.S.	E.U.	Europa	Japón
Fecha de lanzamiento	junio 1978	noviembre 1981	octubre 1984	marzo 1991	abril 1994	julio 1991	febrero 1992
Tiempo de vida (diseño)	3 menes	2.5 días	8 días	2 años	cada 11 días	3 años	2 años
Longitud de onda (cm)	23.5	23.5	23.5	10	23.9, 5.7, 9.6	5.7	23.5
Angulo de incidencia nominal (°)	23	50	15 - 64	30 - 60	15 - 50	23	38
Resolución nominal en la dirección del alcance (m)	25	40	25	15 - 30	10 - 26	26	18
Resolución nominal en la dirección del azimut (m)	25	40	17 – 58	15	30	28	18
Número de observaciones	4	6	4	> 4	4	3	3
Ancho del área iluminada (km)	100	50	10 - 60	20 - 45	15 – 60	100	75
Repetición del ciclo (días)	17, 3	nula	nula	nula	nula	3, 35, 176	44

Tabla 1. Sistemas SAR antiguos. Fuente: adaptación GlobeSAR

De ellos tenemos que destacar el Seasat que fue el primer satélite equipado con SAR. Principalemente fue diseñado para observación oceanográfica y permitió realizar, entre otras aplicaciones, estudios sobre la altura del oleaje y corrientes oceánicas.

También tenemos que citar el programa ERS (*European Remote Sensing Satellite*) con el satélite ERS-1, ya que fue el primer satélite europeo de teledetección. Entre sus equipos de

abordo cuenta con dos sensores radar y un sensor de infrarrojo térmico. Los sensores radar incluyen un radar de imágenes, un dispersómetro de viento y un altímetro.

Satélite /Tipo de información	ERS-2	RADARSAT 1	Envisat 1 ASAR	ALOS PALSAR	SAOCOM	RADARSAT 2
País	Europa	Canadá	Europa	Japón	Argentina	Canadá
Fecha de lanzamiento	abril 1995	Noviembre 1995	2001	2002	2003	2003
Tiempo de vida (diseño)	3 años	5 años	5 años	3-5 años	5 años	5 años
Longitud de onda (cm)	5.7	5.7	5.6	23.6	23	5.6
Ángulo de incidencia nominal (°)	23	10 – 59	15 – 45	8-60	15-40	10 – 60
Resolución nominal en la dirección del alcance (m)	26	10 – 100	30 – 1000	10-100	10-100	3 – 100
Nominal resolución en la dirección del azimut (m)	28	9 – 100	30 – 1000	10-100	10-100	3 – 100
Número de observaciones	3	1 – 8	8	2-8	2-8	1 – 8
Ancho del área iluminada (km)	100	50 – 500	60 – 405	30-350	35-360	10 – 500
Repetición del ciclo (días)	35	24	35	46	7	24

Tabla 2. Sistemas SAR actuales. Fuente: adaptación GlobeSAR

Entre los sistemas actuales tenemos dentro del programa ERS, el ERS-2, que además de los sensores que transportaba también el ERS-1 incluye un instrumento para la medida de Ozono. Una de las aplicaciones más utilizadas dentro del programa ERS ha sido la representación cartográfica de la superficie terrestre mediante interferometría radar con una alta precisión utilizando ambos satélites.

Uno de las plataformas radar más recientes y avanzadas es RADARSAT en su versión 2. Es un equipo con una resolución de 3 metros, que tiene la capacidad de observar a ambos lados de la trayectoria del satélite y que permite la selección de la polarización del haz emitido.

47.6. Técnicas de tratamiento

Vamos a examinar las distintas técnicas para mejorar las características radiométricas y geométricas de la imagen radar.

47.6.1. Correcciones radiométricas

- Desvanecimiento: el desvanecimiento es una caída de la luminosidad en función del alcance debido a la presencia de varios objetos reflectores en una misma célula de resolución con diferencias de posición en la dirección del alcance, inferiores a la longitud de onda.

- Moteado: es una interferencia coherente de las ondas reflejadas de forma difusa por los elementos del terreno. Este efecto genera en la imagen una apariencia de tipo granular tipo sal y pimienta, que es el factor dominante en las imágenes radar. La suma de las reflexionas difusas en el procesado de la imagen produce interferencias constructivas y destructivas de forma aleatoria de forma que por un lado se aumenta el brillo de los pixeles y por otro disminuye, respectivamente.(pg 216)

  Para reducir estos efectos existen dos técnicas lineales:

  - Mediante filtrado por observaciones múltiples: consiste en dividir la señal en bandas y generar las correspondientes imágenes
  - Promediando los pixeles adyacentes

Al filtrar estos efectos se consigue una mejor identificación de los objetos de la imagen, se pueden emplear técnicas de segmentación automática con mejores resultados y mejora el rendimiento para la aplicación de técnicas clásicas como detectores de bordes y clasificadores.

- Expansión del contraste: para hacer coincidir el intervalo dinámico de los datos con el intervalo dinámico del dispositivo para la visualización. Sirve para mejorar la interpretación visual.

47.6.2. Correcciones radiométricas

- Desplazamiento por relieve: es producido por la configuración de la observación. El sistema radar observa de forma lateral formando perspectivas oblicuas de la superficie. La distorsión que se produce es perpendicular a la trayectoria del satélite, de forma que objetos con mayor altitud presentan mayores desplazamientos hacia el sensor.
- Escorzo: es una apariencia de compresión de las características topográficas de la imagen. En la siguiente figura vemos la configuración geométrica de la observación y este efecto.

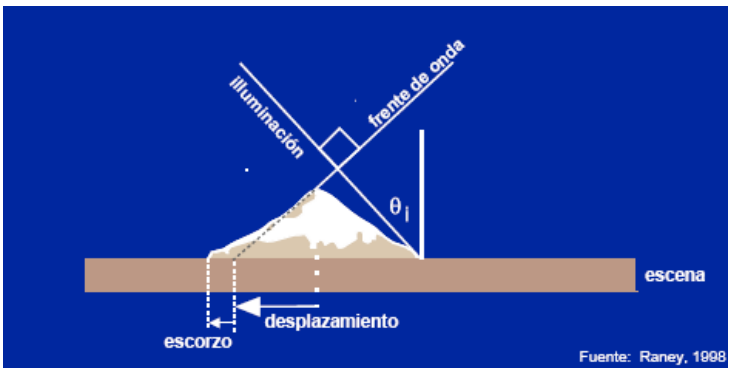


Figura 7. Distorsión geométrica: escorzo

- Inversión del relieve: es un caso extremo del escorzo y ocurre cuando el ángulo de incidencia θ, es menor que el declive topográfico. Esto hace que la cima de una montaña aparezca sobre la ladera en declive.

Corregir estos efectos geométricos supone introducir desplazamientos en la imagen original. Los algoritmos que se utilizan para la corrección geométrica se clasifican de acuerdo a tres métodos:

- Método de conversión del alcance a alcance sobre el relieve (proyectar la imagen radar a la superficie del terreno)
- Método polinomial (mejor ajuste a una proyección cartográfica)
- Método radargramétrico (formulación analítica de las deformaciones en la imagen radar)

El último método es que presenta mejores resultados al considerar la geometría del sensor y la información de elevaciones del terreno generando directamente una ortoimagen corregida de todas las distorsiones.

Por último, citar únicamente las técnicas de tratamiento para la extracción de información de las imágenes, se utilizan técnicas de clasificación y de detección de cambios.
Las técnicas de clasificación buscan separar las clases más importante con el mínimo error mediante fronteras de decisión. Los métodos empleados son: la clasificación supervisada y la clasificación no supervisada. Se emplean algoritmos de clasificación como el de mínima distancia, el de paralelepípedos o el de máxima verosimilitud.

En cuanto a detección de cambios, son utilizadas para observar la evolución de algún fenómeno, como por ejemplo el desarrollo urbano. Para esto se utilizan dos o más imágenes de una misma área geográfica objeto de estudio. Las plataformas radar son muy útiles en este campo ya que presentan una resolución temporal alta, es decir, los satélites visitan frecuentemente una misma región. Algunas metodologías empleadas son: la imagen diferencia, la imagen proporción, comparación de la clasificación y análisis del vector de cambio.

47.7. Aplicaciones

Las imágenes radar son utilizadas para una gran variedad de campos: estudios geológicos y geomorfológicos, la observación de la superficie oceánica, estudios hidrológicos, seguimiento de la vegetación, cartografía de zonas polares y tropicales, estudio de zonas urbanas, etc.
Las ventajas principales que muestran los sistemas radar son:

- Tienen sensibilidad a la geometría del terreno y a los elementos reflectores en él. Esto es importante para la identificación o la cartografía de vegetación y para determinar características de rugosidad de la superficie observada.
- Sensibilidad al contenido en agua de la capa superficial. La capacidad de penetración de las microondas depende del contenido de humedad del suelo, de la frecuencia y del ángulo de incidencia de las ondas
- Tienen capacidad de adquisición bajo condiciones que no sería posible desde sensores aerotransportados y sensores ópticos con el objetivo de aplicarse a trabajos de detección y seguimiento.

Entre las aplicaciones oceanográficas están la observación del rizado de la superficie marina, la medida del viento en superficie, la formación de imágenes batimétricas, descubrimiento de la topografía submarina, detección de embarcaciones, detección de derrames de petróleo, cartografía del hielo en el océano, etc.

Aplicaciones en la superficie continental tenemos el seguimiento de inundaciones, el control de la explotación de bosques, especialmente los tropicales que suelen estar cubiertos de nubes, la cartografía de usos del suelo y humedad de los mismos, identificación de cosechas (condiciones, detección de daños, seguimientos), rastros de incendios, relieve del terreno, cartografía en desiertos, cartografía estereoscópica para generación de imágenes de perspectiva, exploración geológica, cartografía de humedales, cartografía de la nieve, modelos hidrológicos.

También tenemos aplicaciones cartográficas puras como la ortorectificación de imágenes radar utilizando modelos digitales del terreno, o la integración de las propias imágenes previamente georeferenciadas en sistemas de información geográficos.

47.8. Interferometría

La interferometría se refiere al uso de dos imágenes SAR bien tomadas desde el mismo o entre distintos sensores con dos configuraciones diferentes:

- Interferometría por repetición de trayectoria: tomando las imágenes en momentos diferentes de la misma superficie
- Interferometría transversal a la trayectoria: observando la misma superficie desde dos puntos de vista diferentes, considerando una distancia de paralaje entre las imágenes transversales a la trayectoria.

También existe otra configuración a lo largo de la trayectoria, en donde dos sensores van separados una determinada distancia para observar la velocidad de objetos.

La diferencia de la fase entre las dos imágenes se procesa para obtener información de la altura y/o del movimiento de la superficie de la Tierra.

La interferometría es un método relativo de medida de distancias en donde un sistema interferómetro genera el desfase entre dos señales. El método interferométrico se basa en la medición de la interferencia que crean estas dos señales cuando son combinadas.

Si un sensor SAR observa una misma zona de la superficie terrestre en dos momentos diferentes con la misma configuración de toma, se procesan las imágenes y se combinan, si en la superficie u objeto observado en la última observación ha ocurrido algún fenómeno que ha modificado la superficie, como por ejemplo un corrimiento de tierras, la combinación de las dos imágenes mostrará unos anillos de interferencia debido a que al combinar la fase de ambas imágenes los picos de las ondas ya no coinciden unos con otros por esa modificación del relieve y se producen orlas de interferencia generadas por la combinación de picos y valles de ondas. Si hemos definido previamente el intervalo de tiempo entre la adquisición de imágenes, con el desplazamiento obtenido de las diferencias de fase se podrían calcular las velocidades, es decir, podríamos determinar el movimiento del corrimiento de tierras, en este ejemplo.

La resolución que se consigue con el sistema interferométrico es mucho mayor que la que se consigue con el SAR. La distancia que mide el sensor radar se puede realizar de dos maneras: una de ellas observando el retraso de tiempo del eco reflejado y otra es utilizando la fase. Esta última llega a resoluciones del orden del milímetro, frente a las distancias por retraso en el tiempo que son del orden del metro a varios metros.

Por lo tanto la media utilizando la fase es mucho más precisa pero es una medida relativa.
Es importante realizar la medida de la coherencia antes del procesamiento de interferometría SAR (en adelante InSAR), la magnitud de la coherencia está relacionada con la desviación estándar local de la fase diferencial. Un valor alto de coherencia nos indica la buena calidad de la imagen (entre 0,7 y 1), valores bajos de coherencia pueden indicar que las imágenes tienen una mala relación señal/ruido (entre 0,3 y 0,5). En definitiva, si los valores de coherencia son apropiados podremos realizar el procesamiento InSAR, en caso contrario no es conveniente ya que el resultado no será fiable.

También el valor de coherencia es utilizado como parámetro clasificador del terreno, de modo que:

- Coherencia baja-> suele ser agua
- Coherencia moderada -> puede ser vegetación en crecimiento o en movimiento

- Coherencia alta -> se relaciona con desiertos, ciudades, en general con características estables.

La imagen obtenida del procesamiento InSAR se denomina interferograma.

Son muchas las aplicaciones que se están dado a esta tecnología, en el campo de los mapas topográficos (con precisiones de 3 a 20 metros) se utilizan para elaborar modelos de elevaciones del terreno con precisiones de hasta 3 metros, vistas perspectivas, en el campo de las medidas del movimiento en la superficie de la Tierra (exactitudes de 2cm/observación), tenemos la interferometría diferencial para determinar cambios en altura (subsidencias), desplazamientos horizontales (terremotos, glaciares), cambios en la retroreflexión de la superficie (detección de cambios del suelo), etc.

47.9. Obtención de Modelos de Elevaciones de imagen radar mediante INSAR

Dos imágenes SAR pueden ser combinadas para producir un interferograma radar, del cual podemos extraer información de la tercera dimensión, la altura.

Los modelos digitales del terreno son representaciones regulares sobre una malla predefinida para representar la topografía de una región. Los métodos InSAR para la determinación de modelos de elevaciones varían en función de la geometría del sistema de transmisión y recepción de la antena radar. Los sistemas utilizados para aplicaciones topográficas tienen diferentes configuraciones para obtener una misma superficie desde dos puntos de vista diferentes. Por ejemplo el utilizado por la Agencia Espacial Europea (ESA) con los sistemas ERS-1 y ERS-2 es una configuración de ambas plataformas en la misma trayectoria, en la que un sistema sigue al otro a una determinada distancia observado una región común con una repetición temporal de un día para permitir la generación de mapas topográficos.

En la siguiente figura se muestra la geometría para la interferometría de seguimiento periódico:

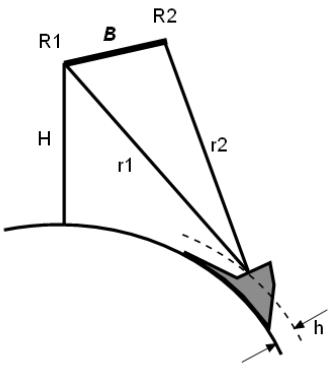


Figura 8. Geometría InSAR para la generación de modelo de elevaciones del terreno

El objetivo es determinar la altura *h* de cada punto de la imagen desde las dos imágenes SAR. La longitud de onda microondas de la portadora λ es conocida del diseño del sensor radar. La altura de órbita del satélite y la separación del vector ***B*** pueden ser estimadas del cálculo preciso de órbitas. La distancia de alcance para el sensor R1, es decir, r1, es determinada a partir de la medida del retraso del eco recibido y la diferencia relativa entre las dos medidas de fases es el interferograma.

Se asume que no hay cambios en las propiedades de la superficie, ni en la elevación, ni retrasos atmosféricos durante el corto periodo que los satélites pasan por la superficie. La fase de cada punto en la imagen radar es igual a la suma coherente de los ecos correspondientes al punto. Entonces la medida de diferencia de fase entre dos imágenes es debida únicamente a diferencias en la propagación de la fase, la cual es proporcional a la diferencia en el retardo obtenido de $\phi = {}^{4\pi}\!/_{\lambda}\,(r1 - r2)$, donde r1,r2 son las distancias al punto de la imagen en la dirección del alcance desde los sensores R1 yR2 respectivamente.

La propagación de la diferencia de fase depende de la geometría de la configuración de los dos sensores y del punto de la imagen. Entonces si la configuración de la antena (vector *B* y distancia r1) son conocidos, la diferencia de fase permite la determinación topográfica de la zona de estudio. Esta aproximación, es similar a la determinación de la topografía utilizada en el análisis estereoscópico de imágenes estándar fotográficas.

El punto observado de una imagen junto con su conjugado en la otra imagen, forman el denominado interferograma, cuya fase es una orla de interferencia patrón que representa la diferencia de la propagación de la fase de las dos imágenes SAR. Esta diferencia de fase solamente puede ser determinada por el modulo 2π.

Los interferogramas suelen representarse visualmente superponiendo el brillo (intensidad de la interferencia) en escala de grises y la fase en color, donde cada ciclo de color (cada orla o interferencia) representa un cambio de fase de 2π radianes, que se traduce en un intervalo de altura.
En la siguiente tabla se muestran las resoluciones y precisiones de algunos de los sistemas radar que realizan este tipo de estudios:

Satélite	Resolución (m)	Precisión (m)	Notas
ERS –1 y ERS-2	24	3-20	Para la mayoría de las regiones, excepto bosques tropicales o esas con mucha vegetación o con humedad variable. El archivo de datos de la misión Tandem ERS-1/2 es muy completo.
JERS	18	10-20	La banda L muestra mejor coherencia que la banda C (para la mayoría de los tipos de terreno y durante mayores periodos de tiempo.
RADARSAT (Modo estándard)	20-29	10-20	Se prefieren terrenos secos debido a la repetición de órbita en 24 horas y a la potencial pérdida de coherencia
RADARSAT (Modo fino)	7-9	3-10	Se prefieren terrenos secos. Mayores líneas de base posibles, se mejora la resolución y se reduce la sensitividad a los efectos de propagación.

Tabla 3. Precisiones de los modelos de elevaciones con InSAR

47.10. Estudios de subsidencias

La redistribución de materiales en niveles bajos de la corteza terrestre pueden causar el levantamiento o la subsidencia de la superficie. Este tipo de estudios se refieren a los relacionados con la actividad humana que debidos a la consecuencia de la extracción de materiales como aguas subterráneas, petróleo o carbón pueden causar de forma repentina subsidencias que ponen en riesgo la actividades humanas y las infraestructuras.
En este sentido es necesario establecer sistemas de detección, monitorización y control de las subsidencias. La interferometría SAR tiene un gran potencial en esta área de estudio ya que permite monitorizar amplias zonas evitando el trabajo de campo.

Para los científicos que estudian la deformación tectónica son muy útiles los estudios de subsidencias de forma que puedan evitar malas interpretaciones tectónicas. Este tipo de estudios se has realizado con InSAR utilizando los satélites ERS.

Por ejemplo, la extracción de fluidos (petróleo, gas) para la producción energética causa subsidencia en muchas regiones. Primero de detecta y se mide la subsidencia a partir de un interferograma generado para entender la relación entre inyección, extracción, subsidencia y fallas en los pozos. Este conocimiento será aplicado en el desarrollo de estrategias de producción. Los alrededores de los campos petrolíferos tienen poca vegetación y poca precipitación por lo que la coherencia es generalmente alta y la contrastación de los resultados InSAR con las mediciones GPS es buena.

Variaciones en el nivel freático del agua es una de las causas más extendidas de subsidencia. Las elevadas demandas de agua para las zonas agrícolas o urbanas han causado subsidencias en muchas partes del mundo.

Las áreas urbanas son más vulnerables al peligro por la subsidencia y afortunadamente son buenas superficies para la interferometría SAR ya que la coherencia se mantiene durante largos periodos de tiempo

Bibliografía

[1] Bürgmann, R., Rosen, P.A. and Fielding, E.J. *Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci 2000: 169-209.

[2] Chuvieco, E. *Fundamentos de Teledetección espacial*. 3ª edición revisada. Ed. Rialp.Madrid 1996.

[3] GlobeSAR Program. *Introducción a la percepción remota mediante radar*. Canada Centre for Remote Sensing.

[4] Pinilla, C. *Elementos de teledetección*. Ra-ma editorial. Madrid 1995.

[5] Pinilla, C. *Introducción al Radar en Teledetección*. (Apuntes, nº8) Universidad de Jaén, 1996.

Tema 48. Normalización y difusión de la información de Teledetección: Estándares ISO y OGC aplicables a imágenes. Formatos, Metadatos. Los datos ráster en las Infraestructuras de Datos Espaciales. Servidores de imágenes en Internet. Organizaciones y Programas nacionales e internacionales de Teledetección: GEO, GMES, Corine, PNOT (SIOSE, PNT).

48.1. Normalización y difusión de la información de Teledetección: Estándares ISO y OGC aplicables a imágenes

La normalización va a suponer un desarrollo efectivo de todos los procesos de Teledetección. Desde la captura de la información, pasando por el procesado de la misma hasta llegar a la diseminación de los datos.

En lo que respecta a la captura de los datos, será precisa la normalización de las especificaciones de los sensores, cada uno de ellos con unas características determinadas. La información registrada se almacenará con respecto a un sistema de referencia del sensor. Y posteriormente la imagen será tratada convenientemente para su uso en múltiples aplicaciones.

Desde el punto de vista de la diseminación de la información, se deberá buscar como último objetivo posibilitar el acceso a la información a los distintos usuarios, servidores y aplicaciones desde diferentes ubicaciones, lo que supone una forma común de definir, codificar y estructurar la información geográfica, esto es, permitir la interoperabilidad de la información, que asegurará tanto el acceso como la distribución de la misma, para lo cual, tendremos que recurrir igualmente al uso de estándares.

Dentro de la estandarización ó normalización podemos encontrarnos con distintos niveles. Un organismo de normalización como puede ser el *International Standards Organization* (ISO) ó el Comité Europeo de Normalización (CEN), creará normas. Por otro lado podemos hablar de especificaciones definidas por organizaciones como *Open Geospatial Consortium* (OGC), que podrán llegar a ser estándares tras su uso extenso. Y finalmente podríamos hablar de las recomendaciones dadas en materia de normalización por parte de distintos organismos.

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es una agencia especializada en estandarización. Comprende un extenso número de Comités Técnicos cada uno responsable de un área de especialización. Tiene como objetivo promover el desarrollo de la estandarización.

Entre estos Comités, el ISO/TC 211 de Geomática, es el encargado de desarrollar una familia de normas internacionales para apoyar la compresión y el uso de la información geográfica, aumentar su disponibilidad y accesibilidad y permitir su integración e intercambio. Esto es, posibilitar la interoperabilidad de la información geográfica y contribuir a un desarrollo sostenible. Los resultados se publican en forma de estándares internacionales, correspondiendo en este caso a toda la serie de normativas ISO 19100.

Para llegar a una norma internacional se sigue un proceso que podríamos denominar el calendario de un estándar:

- *PS* (*Proposal Stage*)
- WD (*Working Draft*).
- CD (*Committee Draft*).
- DIS (*Draft International Standard*).
- FDIS (*Final DIS*).
- IS (*International Standard*).

Los estándares ISO concernientes a la información geográfica, pueden especificar el conjunto de métodos y de herramientas que permiten la definición, descripción, adquisición, análisis, y procesamiento de la información geográfica.

Es muy extensa la normativa creada por ISO, algunos de los estándares relacionados con la teledetección se incluyen en la tabla 1.

En materia de especificaciones, *Open Geospatial Consortium* (OGC) es un consorcio internacional sin ánimo de lucro integrado por empresas, administraciones y universidades que participan en acuerdos para desarrollar interfaces públicos que promuevan soluciones para el fomento de la interoperabilidad de la información geográfica.

Las especificaciones de OGC se desarrollan en un procedimiento de consenso apoyado por sus miembros, se trata de especificaciones públicas cuyo objetivo es servir como foro global de colaboración entre desarrolladores, usuarios y productores de datos.

Identificador	Descripción
ISO 6709: 1983	*Standard representation of latitude, longitude and altitude for geographic point locations.* Describe el formato para la representación de la latitud, longitud y altitud para el empleo en el intercambio de datos.
ISO/CD TS 19101-2	*Geographic information - Reference model-Part 2 : Imagery.* Describe el marco de referencia para la estandarización de la información geográfica en lo que respecta a imágenes.
ISO 19115:2003	*Geographic information - Metadata.* Define el esquema para describir la información geográfica y los servicios.
ISO/DIS 19115-2	*Geographic information – Metadata-Part 2: Extensions for imagery and gridded data.* Define el esquema para describir la información geográfica para datos de malla e imágenes.
ISO/TR 19121: 2000	*Geographic information - Imagery and gridded data.* Informe relativo al uso de imágenes y datos ráster, en el contexto del campo de información geográfica.
ISO 19123: 2005	*Geographic information - Schema for coverage geometry and functions.* Define el esquema conceptual para las características espaciales de coberturas.
ISO 19128: 2005	*Geographic information - Web map server interface.* Especifica el comportamiento de un servicio que produce de forma dinámica mapas espacialmente georeferenciados.
ISO/WD TS 19129	*Geographic information – Imagery, gridded and coverage data framework.* Define las especificaciones técnicas del marco de trabajo para imágenes, coberturas y datos de malla.

Tabla 1. Normas ISO relacionadas con Teledetección

La estrategia de OGC se plantea un conjunto de metas:

- Proporcionar especificaciones libres.
- Impulsar la interoperabilidad en la investigación.
- Normas que apoyen a los mercados innovadores en relación con la tecnología geoespacial.
- Enfocar hacia la integración conjunta de toda la información espacial.

El proceso de trabajo de OGC se inicia con la identificación por parte de sus miembros de un problema específico de interoperabilidad, estos problemas se priorizan y se discuten. Tras la identificación del problema de interoperabilidad, todos miembros trabajan en la definición de unos requerimientos para una nueva especificación de interfaz o mejoras para una existente, estos requerimientos marcan el modo en el que los miembros diseñarán una interfaz o código que solucione el problema de interoperabilidad.

Las especificaciones son sencillos documentos de ingeniería que describen como los miembros del OGC se han puesto de acuerdo para solucionar un problema de interoperabilidad. Hasta el

momento que las especificaciones están disponibles como productos de software (comerciales o de otro tipo) no solucionan el problema identificado al principio del proceso, por eso el OGC no termina su trabajo con una especificación aprobada sino que va más lejos.

48.2. Formatos, Metadatos

48.2.1. Formatos

Un formato es la forma en la cual se han codificado los datos, de manera que para que una aplicación determinada pueda abrir, leer o modificar un archivo con un formato determinado, este deberá estar escrito de acuerdo con unas especificaciones preestablecidas.

Algunos formatos tendrán especificaciones públicas, estos serán los formatos abiertos, en contraposición con los formatos propietario, que no tendrán especificaciones públicas y su información solo podrá ser leída, en principio, por un software específico. La diferencia entre estos formatos se pone de manifiesto en el intercambio de información. El formato abierto asegura la interoperabilidad de los datos así como una completa transparencia del contenido de los archivos, mientras que un formato propietario, no asegura que el receptor pueda acceder a los datos intercambiados por no disponer del software adecuado.

Otra importante clasificación de los formatos utilizados para la información geográfica distingue entre formatos para datos ráster y vectoriales.

La información ráster es voluminosa, por ello, en la mayoría de los casos se almacena utilizando algoritmos de compresión determinados, y en muchos casos llegan a constituir formatos propios. Algunos **formatos de ficheros ráster** son:

- **BMP** (*Bitmapped File Format*)

Es el estándar de Windows en DOS, es un fichero sencillo, consta de una cabecera con las características generales de la imagen, como el tamaño, el número de colores y la paleta de colores en caso de ser necesaria. Para la imagen, se almacena píxel por píxel el valor que le corresponde. Tendrá por tanto ventajas por su sencillez y calidad de la imagen y desventajas debido a su gran tamaño. Permite compresión en imágenes de 4 y 8 bits, pudiendo usar el algoritmo RLE (*Run Length Encoding*), de compresión sin perdidas. Admite cualquier tipo de resolución y de profundidad de color, 1, 4, 8 y 24 bits.

- **ECW** (*Enhanced Compressed Wavelet*)

Formato propietario de *Earth Resource Mapping* recomendado para ortofotos y para mapas rasterizados. Proporciona imágenes con un alto grado de compresión junto con alta calidad y rapidez. Utiliza tecnología *wavelet*, basada en la transformación DWT (*discrete wavelet transform*), que mejora la calidad de las imágenes con factores de compresión superiores en comparación con los JPEG tradicionales. El principal problema de este formato es la necesidad de instalar un plugin para realizar la descompresión de los ficheros.

- **GIF** (*Graphic Interchange Format*)

Se trata de un formato de mapa de bits esto es, una tabla que indica los colores que se representarán en la imagen, a los que luego se referencia desde la imagen en sí. La profundidad de color máxima es de 8 bits (256 colores), aunque puede aparentar mas colores mediante una técnica de promediado de colores basada en obtener uno intermedio que no esta en la tabla y colocarlo entre varios píxeles de colores que sí están en ella. Utiliza un formato de compresión sin pérdida, LZW (*Lemple Zif Wellc*). Las versiones GIF87 y GIF89 utilizan el algoritmo LZW modificado, consistente en no solo detectar las repeticiones de un color, sino también las repeticiones de determinadas secuencias. El problema de este algoritmo es que esta patentado, lo que conlleva la posibilidad de tener que pagar derechos de autor. Existe la posibilidad de guardar la imagen en modo entrelazado, que permitirá mostrarla por líneas, de manera que se verá inicialmente una imagen de baja calidad que irá mejorando hasta completar la carga. Este formato permite utilizar máscara de transparencia. Tiene bajo rendimiento con degradados y poca profundidad de color. Utiliza el modo de color indexado, pudiendo trabajar con dos paletas diferentes, una global, para todas las imágenes almacenadas en GIF, y locales, para determinar específicamente la paleta de cada imagen.

- **JPEG** (*Joint Photographic Experts Group*)

Se trata de un formato abierto que nace como respuesta a las limitaciones del formato GIF, mejorando la calidad y tamaño de las imágenes. Es un formato de mapa de bits que utiliza un algoritmo de compresión con pérdida, basado en reducir información aplicando promedios en zonas de degradado, es eficiente en zonas con grandes extensiones de colores planos y uniformes. El algoritmo es configurable, pudiendo determinarse el nivel de compresión a aplicar. Se puede alcanzar ratios de 20:1 casi sin perdida de calidad. Esta pérdida de calidad es generalmente imperceptible para la visualización pero reduce el tamaño de la imagen y mejora la visualización a través de la Web. El método de compresión intenta eliminar información que

el ojo humano no es capaz de distinguir. Con este formato, existe la posibilidad de almacenar la imagen en modo progresivo, de modo que, a la hora de mostrar la imagen en pantalla, esta se podrá visualizar desde un principio aunque con menor calidad hasta que se cargue de forma completa. Podremos almacenar texto y una copia reducida de la imagen, pero no admite la posibilidad de transparencias. Trabaja con imágenes de 24 bits, separados en tres canales (RGB), por lo que permite 16,7 millones de colores (color verdadero). En el caso de imágenes en escala de grises trabaja con un solo canal de 8 bits.

- **JPEG2000**

El objetivo de este formato es mejorar el JPEG basado en la transformación discreta del coseno. Este, utiliza compresión basada en la transformada discreta de *wavelet*, trabajando con niveles mayores de compresión que JPEG y evitando sus errores, como puede ser la generación de bloques uniformes y el aspecto borroso. Es posible generar imágenes de un tamaño determinado, pero no existe posibilidad de transparencias.

- **PNG** (*Portable Network Graphics*)

Surge con el objetivo de sustituir al formato GIF y proporcionar un formato de compresión sin perdida. Puede trabajar en escala de grises (con un canal alfa), en modo color indexado (8 bits, hasta 256 colores) y en modo RGB (24 bits, 16,7 millones de colores y 48 bits para canales alfa), por lo que admite 56 niveles de transparencia. Utiliza el algoritmo de compresión sin perdida LZ77 (un 10% mayor que el alcanzado en el formato GIF), que reduce el tamaño de los archivos sin afectar su calidad, es posible reducir el número de colores aumentando más aún la compresión del fichero. Puede almacenarse la imagen en modo entrelazado, lo que permite una visualización progresiva y también permite formatos con transparencias (incluso distintos grados de transparencia). El tamaño de un fichero PNG, permanece significativamente mayor que el de un JPEG equivalente, por lo que PNG será más ventajoso que GIF para imágenes de 8 bits o menos.

Por otro lado, tenemos información vectorial, algunos **formatos de ficheros tipo vector** son:

- **SVG** (*Scalable Vector Graphic*)

Almacena información vectorial mediante etiquetas, es un formato abierto basado en el estándar (XML, CSS, HTML), el cual permite crear imágenes vectoriales reescalables. Es muy adecuado para salvar ancho de banda, para optimizar el trazado y para permitir el almacenamiento sin

pérdida de calidad. Este formato permite imágenes dinámicas e interactivas, agrupar, transformar y asignar atributos de estilo.

- **SWF** (*Shockwave Flash*)

Formato con ficheros de un tamaño reducido. Se puede almacenar también mapa de bits y textos. Permite escalar sin perdida de calidad. Es necesario tener instalado un plugin, aunque la mayoría de los navegadores ya lo incluyen.

- **SHP** (*Shape*)

Es un formato propietario, desarrollado por ESRI para información vectorial. Está formado por tres archivos: dbf, que contiene la información relativa a los atributos de cada elemento y shp y shx que contienen la información geométrica.

48.2.2. Metadatos

Podemos decir que los metadatos proporcionan información acerca de los datos. Se trata de información estructurada que va a responder a preguntas tales como qué, quién, dónde, por qué o cómo acerca de un conjunto de datos.

Producir metadatos ayuda tanto a usuarios como a productores de datos. A los usuarios les ayuda principalmente a encontrar los datos buscados, mientras que a los productores les evitan duplicidades de datos, les permiten distribuir información fiable y también les ayudan a publicitar los datos producidos.

La principal finalidad de los metadatos es la localización de la información, por lo que cobran especial importancia en las búsquedas a través de Internet. Nos van a permitir comparar los datos, viendo si se adecuan a nuestras necesidades para poderlos manipular de forma adecuada.

Existen múltiples formas de representar los metadatos, pero dado que se busca la interoperabilidad de la información, debemos recurrir a estándares que aseguren el flujo de la información. Por esta razón, a la hora de generar los metadatos es preciso establecer el estándar a utilizar.

Podemos recurrir en primera instancia a los estándares internacionales ISO, en lo que respecta a metadatos podemos destacar:

- **ISO 19115: 2003** *Geographic information - Metadata*.

Este estándar define el esquema necesario para describir información geográfica y servicios, proporcionando información de identificación, extensión, calidad, esquema espacial y temporal, referencia espacial y forma de distribución de datos geográficos. Esta Norma Internacional se aplica en la catalogación de conjuntos de datos, las series del conjunto de datos, los fenómenos geográficos individuales y las propiedades de los fenómenos.

- **ISO/DIS 19115-2**, *Geographic information - Metadata - Part 2: Metadata for imagery and gridded data*.

Esta extensión de la norma internacional de metadatos viene a definir el esquema necesario para describir imágenes y datos de malla. Proporciona información de las propiedades de los equipos de captura usados para adquirir los datos, la geometría de los procesos de medida utilizados por el equipo y los procesos de producción utilizados.

- **ISO/TS 19139** *Geographic information - Metadata - XML schema implementation*.

Esta especificación permite establecer el esquema de implementación de metadatos. Con las normas ISO 19115 e ISO 19115-2, podremos determinar cuales son los datos necesarios para describir un producto, pero no dicen nada de cómo distribuir esta información. Por ello, esta especificación pretende ser una guía de cómo se debe estructurar la información en ficheros XML. Proporcionando la estructura para describir información geográfica a partir de los metadatos.

- **ISO-19119: 2005** *Geographic information - Services*.

Esta norma define el modelo de arquitectura para los interfaces de servicios relacionados con la información geográfica, define la relación con software abierto y muestra un conjunto de ejemplos.

Cumpliendo con la Norma Internacional ISO, el Núcleo Español de Metadatos (NEM) consiste en la selección de un conjunto mínimo de metadatos recomendados por su relevancia o

significado, se trata de un perfil de metadatos recomendado para España, esto es, una recomendación para aplicar de una forma particular la norma internacional.

En lo que respecta a metadatos, también podemos hablar de la Iniciativa *Dublin Core Metadata* (DCMI) y el *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) que fueron los primeros en tratar estos temas. Aunque la estandarización internacional posterior correría a cargo de la ISO.

En Marzo de 1995 aparece la Iniciativa *Dublin Core Metadata* (DCMI) como una organización dedicada a la promoción y difusión de normas interoperables sobre metadatos y el desarrollo de vocabularios especializados para la descripción de recursos que permitan sistemas de recuperación mas inteligentes. Se trata de un foro abierto al desarrollo de estándares de metadatos en línea interoperables que soporten una amplia variedad de propuestas y modelos de negocio.

El *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) se crea en 1990, mediante la Circular A-16 de la *Office of Management and Budget*, con la responsabilidad de coordinar los temas de datos geográficos en los departamentos federales, lo que supone la definición de estándares. Es un comité interagencias que promueve el desarrollo, uso, compartición y diseminación coordinada de datos geoespaciales dentro de una base nacional, este esfuerzo de publicación de ámbito nacional es conocido como la NSDI, una red física organizacional y virtual diseñada para permitir el desarrollo y compartición de los recursos de información geográfica digital de la nación.

48.3. Los datos ráster en las Infraestructuras de Datos Espaciales

La información geográfica constituye un elemento fundamental para el desarrollo sostenible, así como la armonización de modelos de datos y la propia reutilización de los datos. El trabajar dentro de estándares y herramientas basadas en estos estándares hará posible la creación de una Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE).

Podríamos definir una IDE como un conjunto de recursos dedicados a gestionar información geográfica disponible a través de la Web, permitiendo el descubrimiento de datos espaciales, su evaluación y su aplicación para usuarios y suministradores, proporcionando de una manera fácil, cómoda y eficaz la información geográfica disponible, la cual, hasta ahora, constituía un recurso costoso. Se posibilitará la reutilización de la información generada para otros proyectos, reduciendo así su coste de producción.

Cumpliendo con un conjunto de especificaciones, unas condiciones de interoperabilidad, permitirán a los usuarios utilizar y combinar todos estos recursos de acuerdo con sus necesidades, para lo cual solo necesitará un simple navegador Web.

La IDE, alojará datos y atributos geográficos suficientemente documentados, mediante metadatos, de estos dependerá la calidad de esta IDE. Constituirá un medio para la búsqueda, visualización y evaluación, mediante catálogos y servidores de mapas, así como métodos que facilitarán el acceso a los datos. Buscando como objetivo intercambiar información fácilmente a través de la red y adoptando un conjunto de principios, normas y protocolos comunes.

Un elemento fundamental de una IDE es la información geográfica, dentro de esta, distinguimos un conjunto de información necesaria para el uso óptimo de la mayoría de las aplicaciones SIG, es lo que se denomina información del núcleo, entendiendo esta como el menor número de aspectos y características necesarias para representar un tema determinado. En este sentido, tiene gran importancia los estándares ISO 19110 y 19109, el primero define una metodología de catalogación y el segundo las reglas para definir esquemas de aplicación.

Una vez que toda la información geográfica esta documentada, se procede a elaborar un servicio de catálogo de acuerdo con las especificaciones OGC, entendiendo por servicio a una parte diferenciable de funcionalidad proporcionada por una aplicación a través de una interfaz. Junto con este servicio se proporcionarán otros de visualización y acceso. OGC, define las especificaciones de un conjunto de servicios de una IDE, algunos de ellos son:

- ***Web Map Service*** (WMS)

WMS, es una especificación de OGC que permite obtener información geográfica y distribuirla a través de la Web. Esta especificación, ahora estándar internacional ISO 19128:2005 *Geographic information - Web map server interface*, establece un lenguaje de comunicación cliente-servidor, definiendo el comportamiento entre ambos. Adoptando esta especificación, un cliente obtendrá mapas desde un servidor específico compatible con WMS, el cliente representará las imágenes en ventanas estáticas, donde en algunos casos será posible superponer capas distintas de diferentes proveedores. Esto es, interoperabilidad.

- ***Web Feature Service*** (WFS)

El servicio WFS permite a un cliente recuperar y actualizar datos geoespaciales vectoriales.

- ***Web Coverage Service*** (WCS)

La especificación WCS, permitirá intercambiar información geoespacial en forma de coberturas. Esto es, información espacial que representa fenómenos con variaciones espaciales de un fenómeno, como puede ser un modelo digital del terreno o una imagen de satélite.

- ***Web Catalogue Servic****e* (SCW)

Mediante esta especificación, se soporta la capacidad de publicar y consultar metadatos de servicios, datos y objetos relacionados. En un catálogo de metadatos se muestran las características de un recurso determinado, que puede ser consultado y mostrado a fin de ser evaluado y procesado posteriormente. Estos servicios de catálogo apoyan el uso de distintas lenguas a la hora de interrogar al catálogo, así como para la vuelta de los resultados.

- ***Gazzetteer***

La norma ISO 19112:2003 *Geographic information - Spatial referencing by geographic identifiers* define un modelo abstracto para implementar un servicio *gazetteer*, de acuerdo con esta Norma Internacional, un *gazetteer* es un directorio de instancias de una clase o clases de entidades que contienen algún tipo de información relativa a la posición. Un servicio de *gazetteer* seria un servicio accesible de red que proporciona una o mas entidades de acuerdo con una petición filtrada. Esta petición deberá ser posible realizarla de acuerdo con los valores de los distintos atributos de la entidad y especialmente por sus identificadores.

- ***Geoparser***

Este servicio analiza un texto digital realizando comparaciones con un conjunto de nombres geográficos basándose para ello en el servicio de Nomenclator. De manera que se crean enlaces permanentes entre el texto y los fenómenos geográficos. Transformando el texto en un hipertexto con vínculos a la información geográfica.

- ***Geocoder***

Es un servicio accesible de red que transforma una descripción de una localización de una entidad, como el nombre de un lugar, la dirección de una calle o un código postal en una descripción normalizada de la localización, incluyendo las coordenadas geométricas. Este

servicio recibiría una descripción de una localización de una entidad como entrada y proporcionaría como salida una dirección normalizada con su geometría.

- ***Styled Layer Descriptor*** (SLD)

En esta especificación se definen las reglas que permiten al usuario visualizar las entidades geográficas con una simbolización determinada.

48.4. Servidores de imágenes en Internet

Un servidor de imágenes se trata de un servidor en red que da acceso a diferentes capas de información georeferenciada de tipo imagen. La información se almacenará de forma estructurada para que el acceso a los datos sea lo mas rápido posible. El usuario podrá interaccionar con imágenes así como realizar algún tipo de operación con ellas.

En una arquitectura cliente/servidor hay dos elementos fundamentales. Por un lado, un cliente se trata de un explorador de Internet que solicita recursos del servidor, como puede ser información geográfica, y herramientas que permitan interactuar con ella, como puede ser un zoom. Mientras que el servidor, es una máquina donde se encuentran almacenados los datos que se muestran en el cliente.

El servidor gestiona todas las peticiones respondiendo de forma ordenada. El medio de comunicación entre el cliente y el servidor es la red, el cliente al recibir los datos del servidor los interpreta y los muestra al cliente con unas características determinadas. El cliente, desde el navegador, envía al servidor las distintas peticiones usando para ello el protocolo HTTP. Esta petición se realiza con una URL, en donde se indicará el protocolo que estamos usando, el dominio de la máquina y la dirección del servidor.

En función de los datos enviados por el servidor al cliente, podemos encontrar distintos tipos de clientes, en un caso podemos hablar de un cliente que accede directamente a la información con un simple navegador, hablaríamos de un cliente estándar, y por otro lado, podemos hablar de un cliente que necesita instalar un plugin que aumente las prestaciones del navegador para poder visualizar las imágenes que provienen de un formato determinado.

A la hora de implementar un servidor, es necesario considerar un conjunto de aspectos que optimicen su rendimiento y garanticen la seguridad de los datos. Por esto, en ocasiones será necesario realizar depuraciones en el servidor. Algunos aspectos que mejoran el rendimiento del

servidor, puede ser la eliminación de los registros no imprescindibles, El uso de una tarjeta gráfica adecuada, vigilar las aplicaciones residentes que afecten al rendimiento adecuado de la memoria, estimar la velocidad del procesador para evitar cuellos de botella, utilizar un ancho de banda adecuado a la información a servir, seleccionar un formato optimo para proporcionar la información. Generar rangos de escalas para visualizar los datos.

En general los servidores pueden acceder directamente a formatos propietarios sin tener que realizar ningún tipo de transformación.

En un servidor de imágenes podemos encontrarnos con una serie de elementos. Un servidor de aplicaciones que controla el balance de las peticiones que le llegan. Un servidor Web para enviar información vía Web. Un conector para enlazar al servidor de aplicaciones y al servidor Web, un servidor espacial para dar acceso a los datos, una base de datos y un enlace con la base de datos.

48.5. Organizaciones y Programas nacionales e internacionales de Teledetección: GEO, GMES, Corine, PNOT (SIOSE, PNT).

48.5.1. GEO (Group on Earth Observations)

GEO es una organización intergubernamental de participación voluntaria integrada por Gobiernos y por Organizaciones Internacionales. Surge en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible y el G8 en el año 2002 como respuesta a la necesidad de explotar el potencial creciente de las observaciones de la Tierra como elemento esencial en la toma de decisiones. Dentro de GEO se establece un marco donde se pueden desarrollar nuevos proyectos y coordinar las estrategias e inversiones.

El objetivo de GEO es coordinar esfuerzos para implantar un sistema de sistemas de observación global de la Tierra (GEOSS) que sea distribuido, coordinado, completo y sostenible que satisfaga los requerimientos comunes de los usuarios, que permita un acceso a los datos mas sencillo y abierto así como una toma de decisiones mejor informadas.

Esta organización consiste en

- - Plenario, donde se realiza la toma de decisiones integrado por los representantes designados por los miembros y las organizaciones participantes en GEO.
- - Comité ejecutivo, que facilita las decisiones del Plenario supervisando y recomendando sobre su puesta en marcha. Esta integrado por representantes doce regiones.
- - Secretaría, para la identificación de prioridades.

- - Comités y grupos de trabajo, encargados de dirigir los aspectos para la puesta en marcha de GEOSS. Hay 4 Comités: Architecture & Data, Capacity Building, Science & Technology y User Interface.

48.5.2. GMES (Global Monitoring for Environment & Security)

El lanzamiento de GMES surge en 1998, años de investigación asociada a la observación de la Tierra ponían de manifiesto la posibilidad de ofrecer nuevos servicios en múltiples campos.

Es una iniciativa conjunta de la ESA y CE con una financiación compartida para establecer un sistema europeo de observación de la Tierra para la gestión del medio ambiente y la seguridad. Es la solución europea de responder a las necesidades de los ciudadanos en Europa para el acceso a información fiable sobre el estado del Medio Ambiente. Su objetivo es dotar a Europa de un sistema europeo propio de monitorización para aplicaciones medioambientales y de seguridad con autonomía en la adquisición, interpretación y distribución de la información.

GMES apoyará la toma de decisiones de actores privados e institucionales, tratará los datos de la Tierra recibidos de los satélites, los coordinará, analizará y preparará para los usuarios finales.

48.5.3. Corine

El programa CORINE se inicia en 1985 como proyecto experimental para la recopilación de datos, la coordinación y homogeneización de la información sobre el estado del Medio Ambiente y los recursos naturales en la Unión.

De 1985 a 1990 se creó un sistema de información ambiental, para lo cual se desarrollaron nomenclaturas y metodologías de ocupación del suelo con el acuerdo de los países miembros de la Unión Europea.

En el año 1990, el Consejo de la Unión Europea decide crear la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) y establecer una Red de información y Observación del Medio ambiente (EIONET). El objetivo de la AEMA es proveer a la Unión y a los Estados Miembros información fidedigna y comparable en el ámbito europeo que permita desarrollar políticas y criterios de protección del medio ambiente. En 1995, el programa CORINE pasa a ser responsabilidad de la AEMA.

Uno de los proyectos enmarcados en el programa CORINE es el proyecto CORINE Land Cover (CLC) cuyo objetivo fundamental es la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos a escala 1:100.000 sobre la cobertura/uso del territorio, así como la permanente actualización de dicha base de datos geográfica.

Entre finales de los 80 y principios de los 90 se crea en el marco de este proyecto la base de datos de ocupación del suelo CLC90, reconocido como dato clave para el análisis espacial y territorial ya que provee información básica para el análisis espacial y territorial dentro de la Unión Europea.

El uso de la base de datos europea implica un proceso de actualización que permita proveer de la información necesaria y oportuna para la obtención de indicadores de cambio de ocupación del territorio. El proyecto IMAGE & CORINE Land Cover2000 (I&CLC2000) proporcionaran una base de datos de imágenes de satélite homogénea para toda Europa, una base de datos de ocupación del suelo actualizada CLC2000 europea y una base de datos de cambios CLC europea entre los años 1990 y 2000.

48.5.4. Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT)

A nivel Nacional y Regional, la información geográfica se mantiene en Bases de Datos, las cuales no están totalmente integradas. Diferentes escalas, coberturas incompletas de todo el territorio (para las bases de datos Regionales) supone un conjunto de problemas que el Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) pretende solventar.

Los principales objetivos que del PNOT son:

- Aplicar los principios de la directiva Inspire para la información de Usos y Coberturas del suelo.
- Compartir costes para evitar duplicidades, podremos obtener información mejor y mas actualizada.
- Obtener sistemas de información integrados (espacial, temporal y semánticamente) a lo largo de todo el territorio español que permita a las diferentes Instituciones tomar decisiones coordinadas basadas en la misma información.
- Obtener información que satisfaga los requerimientos de las instituciones participantes, Unión Europea (Corine Land Cover, GMES, etc.) y el resto de agentes sociales.

Se distinguen tres fases dentro del PNOT, una primera de obtención y tratamiento de imágenes aeroespaciales, una segunda fase de extracción de información y una tercera de diseminación.

<table>
<tr><td colspan="8">PLAN NACIONAL DE OBSERVACIÓN DEL TERRITORIO (PNOT)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="5">1ª fase:
Obtención y tratamiento de imágenes aeroespaciales</td><td></td><td colspan="3">Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)</td><td colspan="3">Plan Nacional de Teledetección (PNT)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Resolución espacial</td><td>10 cm</td><td>25 cm</td><td>50 cm</td><td>Pancro: 1 a 10 m</td><td>Pancro: 10 a 15 m</td><td rowspan="2">Multiespectral: 100 a 1.000 m</td></tr>
<tr><td>solo costa y zonas urbanizadas</td><td colspan="2">(coberturas alternas)</td><td>Multiesp: 4 a 30 m</td><td>Multiesp: 20 a 50 m</td></tr>
<tr><td>Frecuencia Temporal</td><td>4 años</td><td colspan="2">2 años</td><td>3 a 12 meses</td><td>1 a 6 meses</td><td>2 a 30 días</td></tr>
<tr><td>Coste aproximado (euros / Km2)</td><td>350</td><td>55 (rigurosa)
19 (expedita)</td><td>29 (rigurosa)
7,5 (expedita)</td><td>4 (2,5 m)</td><td>0.05</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Sensores utilizados</td><td>Fotografía aérea digital (4 bandas) con GPS-IMU
Lidar</td><td colspan="2">Fotografía aérea digital (4 bandas) con GPS-IMU
Lidar</td><td>SPOT 5 (HRG)
Formosat
Cartosat,...
Futuro SEOSAT</td><td>Landsat 7 (ETM+)
Landsat 5 (TM)
Futuro DEIMOS
Futuro Sentinel 2</td><td>Terra (MODIS)
Envisat (MERIS)
SPOT (Vegetation)
NOAA</td></tr>
<tr><td rowspan="8">2ª Fase:
Extracción de la información</td><td rowspan="2">Área temática</td><td></td><td colspan="6">Escalas</td></tr>
<tr><td>Organismos participantes</td><td>1: 500 a 1: 2.000</td><td>1: 5.000 a 1: 10.000</td><td colspan="2">1: 25.000 a 1: 50.000</td><td>1: 100.000 a 1: 200.000</td><td>1: 1 Millón</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Topográfica</td><td>AGE</td><td></td><td></td><td colspan="2" rowspan="2">BTN25</td><td>BCN200</td><td>BCN1000</td></tr>
<tr><td>CC.AA.</td><td></td><td>♦</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>CC.LL.</td><td>♦</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Catastral</td><td>AGE</td><td>Catastro urbano</td><td>Catastro rústico</td><td colspan="2"></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Ocupación del Suelo</td><td>Naciones Unidas
Unión Europea
AGE /
CC.AA.</td><td></td><td>SIGPAC
BDOS CCAA</td><td colspan="2">SIOSE
MCA
MFE</td><td>Corine Land Cover 2006
HR FTS</td><td>Globcover</td></tr>
<tr><td>Ambiental</td><td>Unión Europea
AGE /
CC.AA /
Universidades</td><td></td><td></td><td colspan="3">Indicadores Agroambientales por Teledetección</td></tr>
<tr><td>3ª Fase:
Diseminación de la información</td><td colspan="7">Infraestructuras de datos espaciales: INSPIRE, IDEE, IDEs autonómicas,...
Servidores de imágenes: Iberpix, SIGPAC,...</td></tr>
</table>

Tabla 2. Plan Nacional de Observación del Territorio

Los componentes del PNOT son:

- ***Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)***

Ortofotografías de todo el territorio español cada dos años con una tamaño de píxel de 0,50 metros (o inferior), Modelo digital del terreno y Modelo Digital de Superficies con 2 metros. Todo mediante una producción descentralizada.

- ***Plan Nacional de Teledetección (PNT)***

Este programa tiene como objetivos:

- Disminuir al máximo lo costes del uso de la imágenes de satélite y las técnicas de Teledetección, lo que supondrá una adquisición compartida y coordinada de imágenes.
- Facilitar la utilización de las imágenes y datos derivados a partir de especificaciones comunes y consensuadas.

- Disminuir los plazos entre la captación de la imagen y la disponibilidad de los datos derivados, mediante cadenas de producción eficientes.
- La información obtenida deberá ser satisfactoria a las necesidades de los distintos organismos participantes, a la Unión Europea y al resto de agentes sociales.
- Fomentará la consolidación, mejora y expansión del tejido empresarial español en el sector de la Teledetección.
- Fomentará la innovación es España mediante sinergia entre Administración, Universidades, OPIS y empresas.

Este Plan va a suponer la adquisición de imágenes de satélite de todo el territorio español con diferentes resoluciones.

- Alta resolución, coberturas con imágenes de 2 a 10 metros de resolución en modo pancromático y de 10 a 30 metros en modo multiespectral con una periodicidad de una cobertura al año.

- Media resolución, coberturas con imágenes de 10 a 15 metros de resolución en modo pancromático y de 20 a 50 metros en modo multiespectral. La periodicidad prevista es de 4 coberturas al año.

- Baja Resolución, Coberturas con imágenes multiespectrales de 50 a 5.000 metros de resolución y periodicidad de 30 días hasta 15 minutos.

Este Plan va a suponer también la adquisición de imágenes históricas del territorio español de todos los años desde la puesta en funcionamiento de cada satélite, aprovechando que los sensores de media y baja resolución archivan sistemáticamente todas las imágenes que toman.

- ***Sistema de información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE)***

Este programa, integrará datos de diferentes administraciones, regionales y nacionales. Se pretende obtener una infraestructura de información geográfica multidisciplinar y actualizada cada 5 años con una escala equivalente de 1:25.000. Esto evitará duplicidades y reducirá costes.

El sistema de información geográfica esta constituido por una única capa de polígonos que corresponderán a una clase determinada de acuerdo a un modelo conceptual de datos normalizado, interoperable y armonizado de la ocupación del suelo.

El sistema geodésico de referencia será ETRS89 y la proyección UTM (husos 28, 29, 30 y 31).

Como información de referencia se utilizarán imágenes sobre las que fotointerpretar (SPOT 5 2,5 metros de resolución, LANDSAT, ortofotografías del PNOA, etc.), datos vectoriales sobre los que apoyar los polígonos SIOSE (BCN25 del IGN, información de cartografía catastral de la D.G. del Catastro del Mº de Economía y Hacienda relativos a líneas límite de núcleos urbanos y ejes de calles de urbana, Mapa de Cultivos y Aprovechamientos del Mº de Agricultura, Pesca y Alimentación y Mapa Forestal de España del Mº de Medio Ambiente) y información auxiliar (línea de costa oficial del proyecto SIOSE, límites administrativos oficiales de España, etc.).

El procedimiento será, una vez recopilada toda la información base, la digitalización de los polígonos y la asignación de las coberturas. Posteriormente se realizará una revisión de campo y unos controles de calidad, para finalmente integrar todos los datos.

Bibliografía

[1] Douglas D. Nebert (2004) "The IDE Cookbook version 2.0"

[2] (2001) "OpenGis Implementation Specification: Grid Coverage"

[3] Panagiotis A. Vretanos (2005) "OpenGis Filter Encoding Implementation specification".

[4] Jens Fitzke, Rob Atkinson (2006) "Gazetteer Service Profile of the Web Feature Service Implementation Specification".

[5] Jeff Lansing, Polexis (2001) "Geoparser Service Draft Candidate Implementation Specification".

[6] Serge Margoulies (2001) "Geocoder Service Draft Candidate Implementation Specification".

[7] Dr. Markus Müller, James MacGill (2005) "Styled Layer Descriptor Implementation Specification".

[8] Panagiotis A. Vretanos (2005) "Web Feature Service Implementation Specification".

[9] John D. Evans (2005) "Web Coverage Service (WCS), Version 1.0.0 (Corrigendum)".

[10] Subgrupo de Trabajo del Núcleo Español de Metadatos "Núcleo Español de Metadatos"

[11] Jeff de la Beaujardiere (2006) "OpenGis Web Map Server Implementation Specification".

[12] International Standards Organization "ISO 19115: 2003 Geographic information - Metadata".

[13] International Standards Organization "CD 19115-2, Geographic information - Metadata - Part 2: Metadata for imagery and gridded data".

[14] International Standards Organization "ISO/TS 19139 Geographic information - Metadata - XML schema implementation".

[15] International Standards Organization "ISO-19119: 2005 Geographic information - Services".

[16] http://www.iso.org

[17] http://www.isotc211.org

[18] http://www.opengeospatial.org

[19] http://www.jpeg.org

[20] http://dublincore.org

[21] http://www.fgdc.gov

[22] Mapa de Ocupación del Suelo en España. Corine Land Cover – Proyecto I&CLC2000

[23] http://www.earthobservations.org

[24] http://www.gmes.info

[25] http://http://www.ign.es/ign/es/IGN/home.jsp