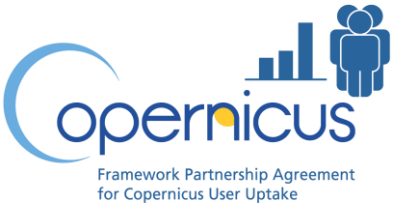

El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial

---

Fundamentos de teledetección aplicada

Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea

Framework Partnership Agreement 275/G/GRO/COPE/17/10042

Specific Grant Agreement number: 2018/SI2.810140/04

Índice

Índice 2
1 Introducción a la teledetección 3
1.1 Marco histórico y situación actual de la teledetección 3
1.2 Ventajas y aplicaciones de la teledetección 3
1.2.1 Aplicación a las emergencias 4
1.2.2 Aplicación a la agricultura 4
1.2.3 Estudios de biodiversidad 5
2 Principios físicos de la teledetección 7
2.1 Cómo se captura la información 7
2.2 El espectro electromagnético 7
2.3 Ventanas atmosféricas 8
2.4 Comportamiento espectral de las cubiertas 9
2.5 Firmas espectrales 10
2.5.1 Comportamiento espectral de la cubierta vegetal 11
3 Satélites de observación de la Tierra 12
3.1 Tipos de órbitas 12
3.2 Tipos de sensores 13
3.3 Principales misiones de observación de la Tierra 14
3.3.1 El programa Landsat 14
3.3.2 El programa SPOT 15
3.4 Principales misiones de observación de la Tierra 16
4 Procesamiento de imágenes multiespectrales 17
4.1 Formatos y visualización 17
4.1.1 Formatos de imagen 17
4.1.2 Visualización de imágenes multibanda o multiespectrales 18
4.2 Correcciones geométricas 20
4.3 Correcciones atmosféricas 20
4.4 Tratamientos radiométricos 22
4.4.1 Equilibrados Radiométricos 22
4.4.2 Mosaicos 22
4.4.3 Realces o expansión del histograma 24
4.4.4 Filtros 25
4.4.5 Pansharpening 26

1 Introducción a la teledetección

La teledetección es la técnica para detectar objetos terrestres a distancia. Para hacer teledetección se necesita un sensor que sea capaz de registrar radiación electromagnética de la superficie de la Tierra, los objetos terrestres y la plataforma portadora de ese sensor. La técnica de teledetección también incluye todo el trabajo realizado a posteriori con esas imágenes, es decir, su procesamiento e interpretación.

Cuando el sensor va a bordo de un satélite hablamos de teledetección espacial, si captura información desde un avión se habla de teledetección aerotransportada.

El objetivo de este módulo del curso será adquirir un conocimiento básico y general sobre **teledetección espacial**.

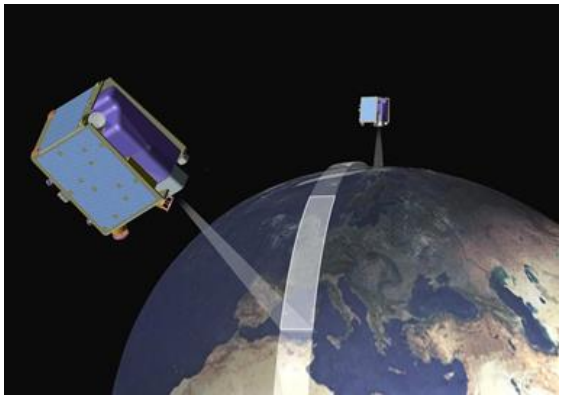

Figura 1 Teledetección espacial

1.1 Marco histórico y situación actual de la teledetección

Los resultados obtenidos en el estudio de recursos naturales terrestres con los datos de los primeros satélites meteorológicos y las misiones espaciales tripuladas, impulsaron el desarrollo por la NASA del programa ERTS (*Earth Resources Technological Satellite)* conocido también como Programa LANDSAT.

LANDSAT 1 fue el primer satélite específicamente dedicado a teledetección terrestre. Fue puesto en órbita por el gobierno de Estados Unidos en julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978. El último de esta constelación, el LANDSAT 8 se lanzó al espacio en febrero de 2013.

A raíz del éxito de los satélites LANDSAT, muchos países decidieron disponer de sus propios satélites para observación de la Tierra. Algunos ejemplos son: la serie de satélites SPOT franceses, RADARSAT canadiense, el ALOS de Japón, IRS de la India, la constelación de METEOSAT Europea, y gran cantidad de satélites de muy alta resolución (tamaño de píxel menor de 1 metro) que orbitan hoy en día la Tierra (como Geoeye, World-View, Pleiades, Deimos 2, etc.)

Hoy en día, hay permanentemente en órbita centenares de satélites de observación de la Tierra que generan miles de imágenes cada día para aplicaciones de uso civil y militar. Podemos decir que “la Tierra está muy bien observada”.

1.2 Ventajas y aplicaciones de la teledetección

Las principales ventajas que aporta la teledetección espacial frente a los trabajos de campo son:

- Monitorización global de la tierra.
- Permite realizar estudios de regiones más amplias.
- Observación a distintas escalas.

- Permite estudios multitemporales con mayor periodicidad.
- Multidisciplinariedad: es útil es muchas disciplinas.

Todas estas ventajas han propiciado el desarrollo y utilización de la teledetección de manera sistemática en múltiples disciplinas tales como: agricultura, medio ambiente, cartografía, urbanismo, etc.

A continuación, vamos a describir algunos ejemplos de aplicaciones actuales, y los tipos de imágenes que se requieren para cada aplicación.

1.2.1 Aplicación a las emergencias

Por ejemplo: incendios forestales, inundaciones, vertidos de petróleo, terremotos…etc. Son aplicaciones en las que requieren imágenes con alta frecuencia temporal en el periodo de tiempo que se están produciendo el fenómeno. En estos casos es donde más se utilizan imágenes radar, ya que pueden tomar imágenes en cualquier momento del día o de la noche y en condiciones meteorológicas. Para estos casos se buscan también plataformas satelitales que posean "constelaciones" de satélites, iguales o complementarios, para recoger la información demandada con la frecuencia requerida.

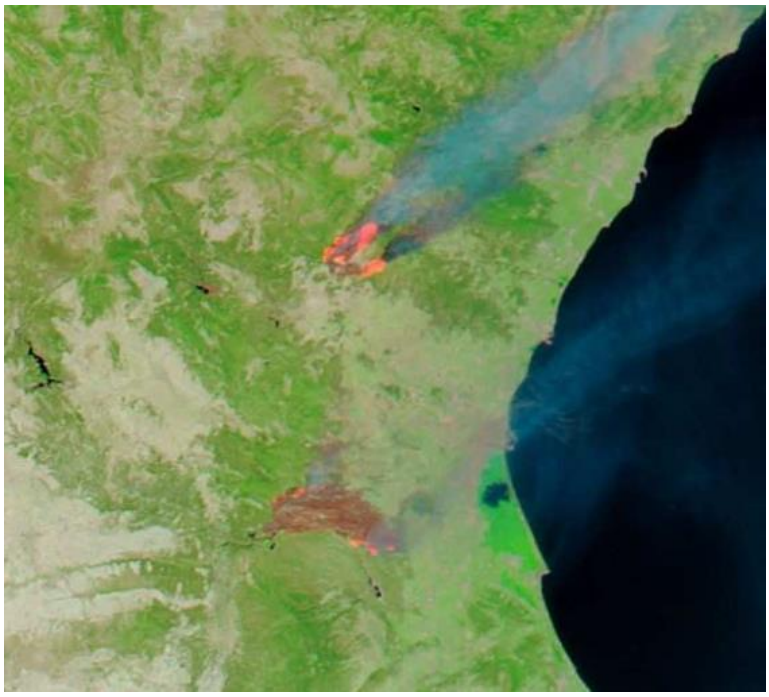

Figura 2 Imagen del sensor MODIS. Incendios declarados en la Comunidad Valenciana, España

1.2.2 Aplicación a la agricultura

La teledetección permite clasificar los tipos de cultivos que aparecen en las imágenes y ayuda a conocer el estado fenológico de cada cultivo mediante las firmas espectrales, por lo que puede ser utilizada para:

- Obtener estadísticas de superficies de cultivos.
- Evolución de superficies ocupadas por cultivos.
- Seguimiento del estado vegetativo de los cultivos y detección de anomalías.
- Gestión del agua de riego y control de su aplicación.
- Agricultura de precisión: predicción del rendimiento de los cultivos y del momento óptimo para su cosecha.

Para estas aplicaciones será necesario disponer de imágenes con una frecuencia temporal que permita hacer un buen seguimiento de los cultivos (de media se necesitará frecuencia semanal o quincenal como mucho).

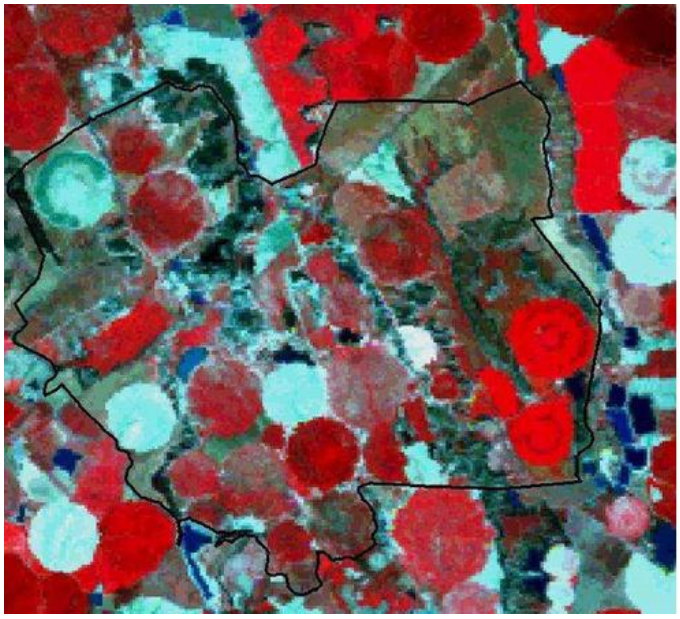

Figura 3 Imagen Landsat en falso color. Identificación de cultivos de regadío

1.2.3 Estudios de biodiversidad

La teledetección permite clasificar los tipos de suelo o coberturas vegetales que aparecen en las imágenes, por lo que puede ser utilizada para:

- Seguimiento de especies y poblaciones animales.
- Realizar cartografía e inventarios de la cobertura vegetal del suelo.
- Evaluar las condiciones de estrés en la vegetación por los efectos de la sequía o la deforestación.

La siguiente imagen es el llamado "índice de vegetación" (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido para toda la Tierra a partir de imágenes del sensor MODIS, con 1 Km de tamaño de píxel. A golpe de vista permite hacerse una buena idea de dónde se encuentran localizadas las zonas de mayor vegetación en el mundo y donde los grandes desiertos.

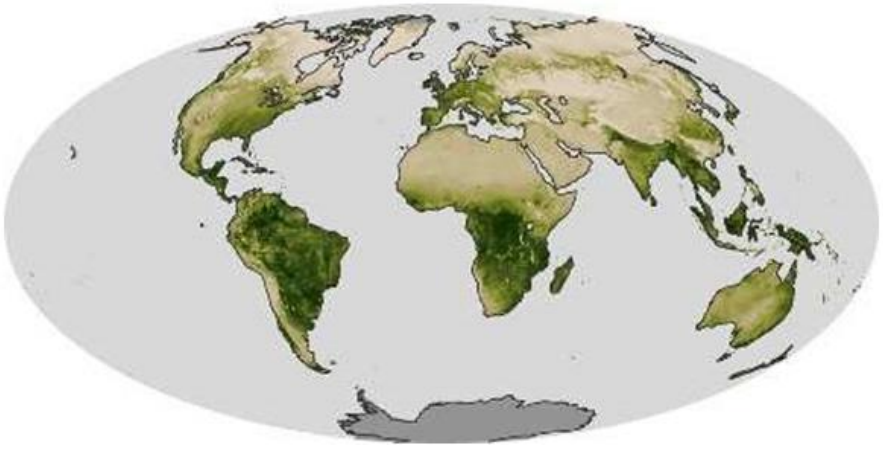

Figura 4 Distribución de la vegetación a nivel mundial

En la mayoría de las aplicaciones descritas, la teledetección se combina con otras técnicas o con otras fuentes de datos para llegar al resultado final, es decir, que muchas veces la teledetección funciona como apoyo para conseguir mejores resultados.

2 Principios físicos de la teledetección

2.1 Cómo se captura la información

Los factores que intervienen en la formación de una imagen por teledetección, cuando se utilizan sensores pasivos son:

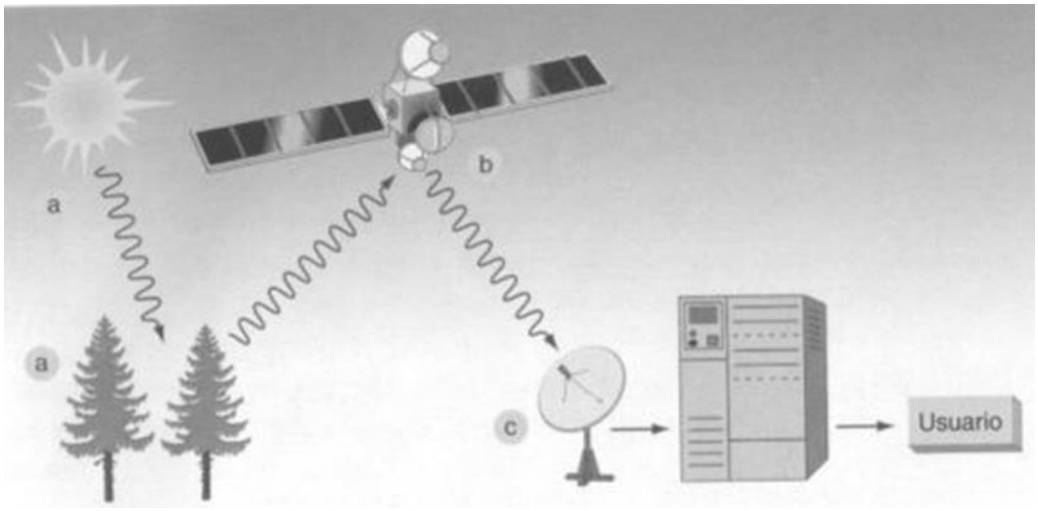

Figura 5 Elementos en un sistema de teledetección

a) **Fuente de iluminación:** en el caso de los sensores pasivos es el Sol.

b) **Sensor** que registra la energía del sol reflejada por la superficie de la Tierra.

c) **Antena en Tierra** para recepción de la información capturada por los sensores.

d) **Software adecuado** para el procesamiento y análisis de la información.

e) **Usuarios** de los distintos productos obtenidos de los procesos anteriores.

El sensor captura la energía que refleja la Tierra procedente del sol, la discretiza y almacena y la transmite a una estación de recepción y procesamiento en la Tierra donde los datos se convierten en imágenes digitales. La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados.

2.2 El espectro electromagnético

Las partes del espectro electromagnéticas más utilizadas en teledetección (según su longitud de onda) son:

- **El espectro visible:** se llama así a la región del espectro comprendida entre 0,4 y 0,7 micrómetros aproximadamente. Es la única radiación electromagnética que el ojo humano puede percibir. Dentro del espectro visible se pueden distinguir tres franjas: el azul (de 0,4 a 0,5 μm), el verde (de 0,5 a 0,6 μm) y el rojo (de 0,6 a 0,7 μm).
- **El infrarrojo cercano (NIR, *Near Infrared*)**: se llama así a la región del espectro comprendida entre 0,7 y 1,3 micrómetros aproximadamente. Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad porque estas cubiertas tienes picos de reflectancia en este intervalo del espectro.
- **El infrarrojo medio (SWIR, *Short Wave Infrared*):** se llama así a la región del espectro comprendida entre 1,3 y 8 micrómetros aproximadamente. Resulta idóneo para estimar contenidos de humedad en la vegetación y para detección de focos de temperatura.

- **El infrarrojo térmico (TIR, *Thermal Infrared*):** se llama así a la región del espectro comprendida entre 8 y 100 micrómetros aproximadamente. Detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- **Las microondas:** comprenden la región del espectro a partir de 1 mm hasta 1 metro. Se utilizan en teledetección porque es un tipo de radiación bastante transparente a las cubiertas nubosas, es decir, que atraviesa bastante las nubes.

Se suele llamar **dominio óptico** del espectro a la parte visible e infrarroja, hasta el SWIR, puesto que es la parte que comúnmente capturan los sensores ópticos

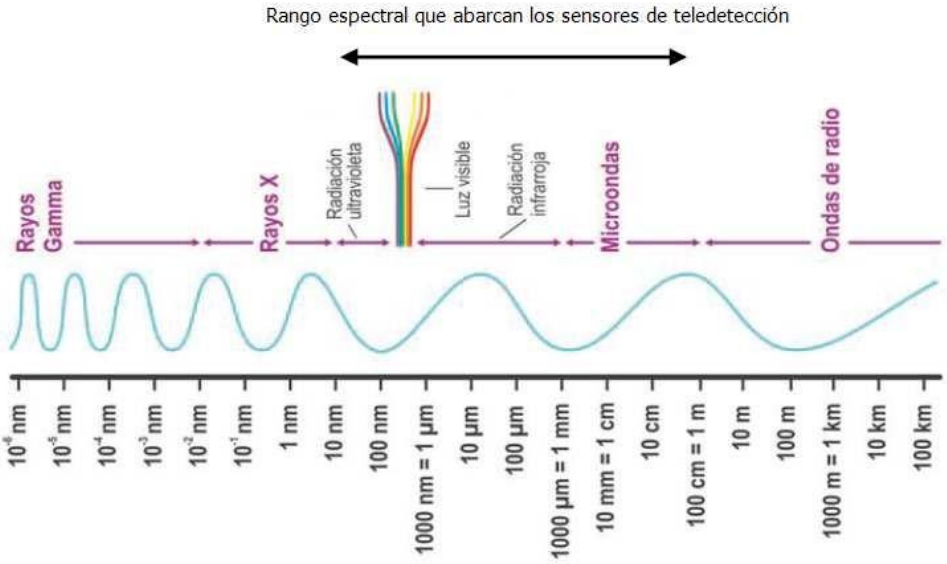

Figura 6 El espectro electromagnético

2.3 Ventanas atmosféricas

Son las zonas del espectro en las que se produce menor absorción y dispersión por la atmósfera, y por tanto son las más útiles para colocar las bandas de los sensores a bordo de satélites.

Como vemos la zona del visible corresponde simultáneamente con el máximo de energía emitida por el sol y con una "ventana" atmosférica.

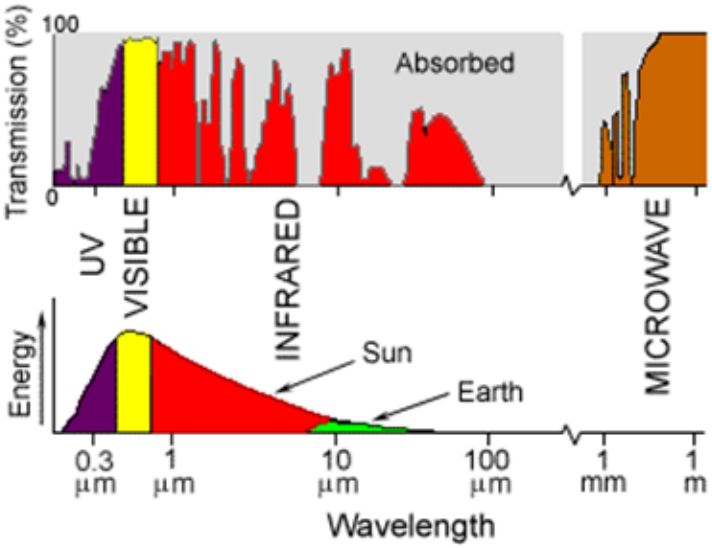

Figura 7 Ventanas atmosféricas y su relación con el máximo de energía emitida por el Sol

2.4 Comportamiento espectral de las cubiertas

Cuando la radiación procedente del sol (llamada radiación incidente) incide en las distintas cubiertas terrestres, puede ser reflejada por la superficie de la Tierra, puede ser transmitida, absorbida o dispersada. En el siguiente gráfico se representan los distintos tipos de comportamiento

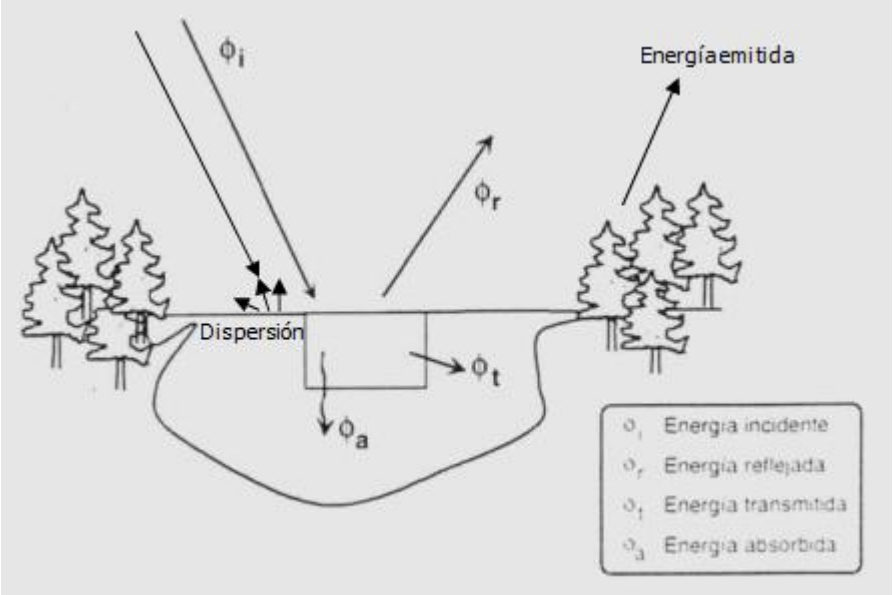

Figura 8 Comportamiento de la radiación incidente

La cantidad de energía que es reflejada, transmitida o absorbida por la superficie terrestre depende de la longitud de onda de la radiación incidente y de las características de cada cubierta (propiedades químicas, rugosidad, etc.).

La siguiente ilustración representa las distintas técnicas existentes en teledetección según el tipo de radiación capturada por los sensores:

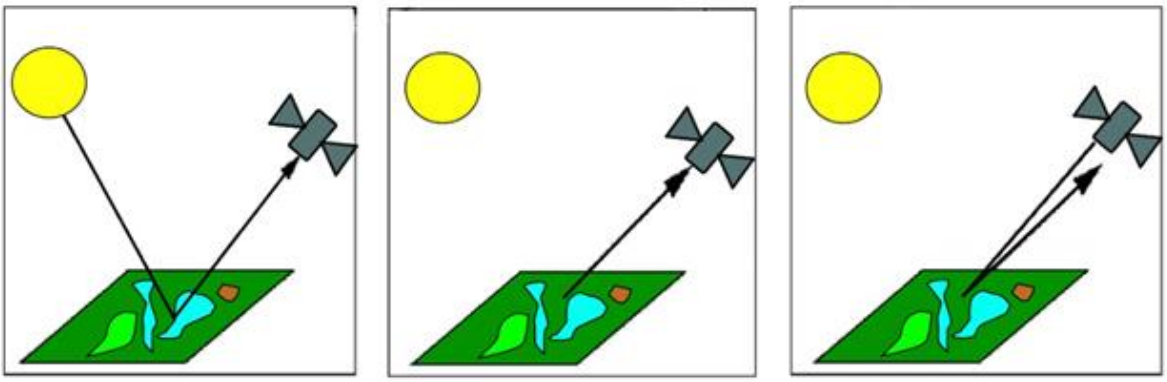

Figura 9 Técnicas utilizando la radiación visible e infrarroja (izquierda); técnicas utilizando la radiación del infrarrojo térmico (centro); técnicas utilizando las microondas (derecha)

Hay que aclarar que los sensores a bordo de satélites no miden directamente la radiación reflejada por las cubiertas de la superficie terrestre, puesto que cuando llega al sensor se ha visto afectada por la atmósfera que modifica los valores originales. La energía reflejada sufre procesos de dispersión y absorción al interactuar con los componentes gaseosos y los aerosoles de la atmósfera.

A la radiación electromagnética que miden los sensores se le llama Radiancia (L), que se define como la cantidad de energía electromagnética que pasa a través o es emitida desde un área en particular, confinada en un ángulo sólido en una dirección específica. El ángulo sólido tiene su vértice en la apertura del sistema sensor y base en la superficie de reflexión. Cuando la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral (L_λ).

Mediante los cálculos adecuados, habrá que transformar estas radiancias espectrales medidas por los sensores en reflectividades propias de cada cubierta para poder elaborar firmas espectrales.

En el siguiente gráfico se muestran los pasos a seguir para obtener firmas espectrales a partir de los niveles digitales que proporciona el sensor:

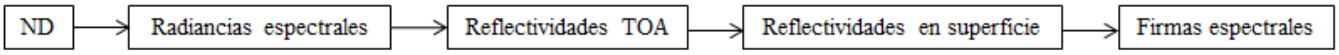

Figura 10 Flujo para obtener

La reflectividad es característica de cada tipo de cubierta y permite diferenciarla de otras, y a partir de esta variable se podrán elaborar las firmas espectrales para cada material que veremos más adelante.

2.5 Firmas espectrales

A partir de las reflectividades en superficie calculadas, se pueden obtener las firmas espectrales de las distintas cubiertas terrestres.

La firma espectral de una cubierta representa la **variación de la reflectividad** en superficie de una cubierta **en función de la longitud de onda** de la radiación incidente.

La superficie de la Tierra está formada por un conjunto heterogéneo de cubiertas con un comportamiento espectral distinto. Cada material, cada sustancia o cada ser vivo reflejan y emiten energía electromagnética de forma distinta, y por tanto cada uno tendrá una firma espectral característica que lo identifica.

En el siguiente gráfico se representa la firma espectral de 4 tipos de cubiertas: agua, vegetación sana, hormigón y nieve.

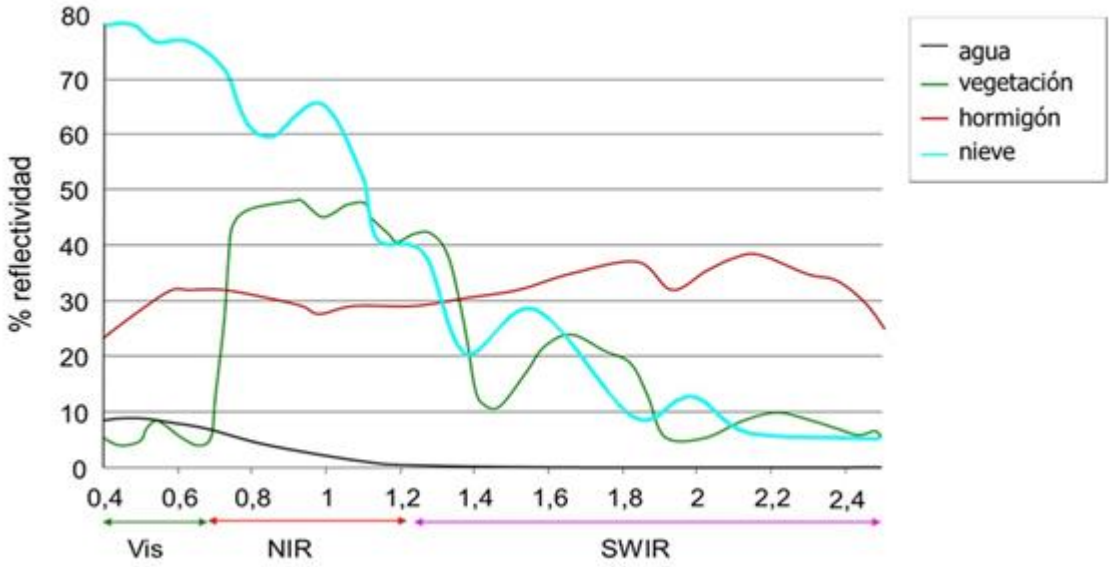

Figura 11 Firmas espectrales de las principales cubiertas

Sólo el estudio del comportamiento espectral de las distintas cubiertas terrestres es una parte muy extensa dentro del proceso de teledetección. Aquí vamos a estudiar algunos ejemplos de las cubiertas más características.

2.5.1 Comportamiento espectral de la cubierta vegetal

La reflectancia de la vegetación sana es bastante baja en la parte del espectro electromagnético correspondiente al visible. Esto es así porque la mayor parte de la energía de ese tipo que llega a las hojas es absorbida, y una cantidad mucho menor es reflejada.

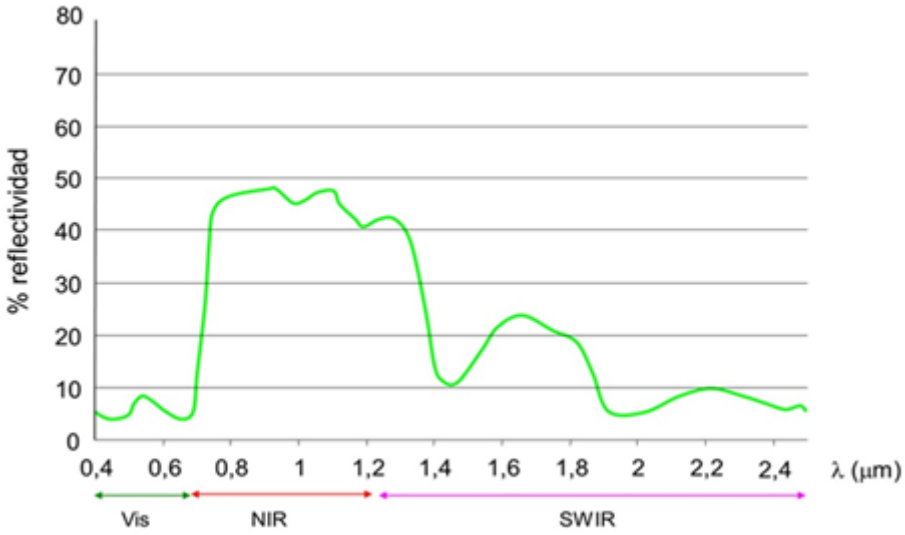

Figura 12 Comportamiento espectral de la cubierta vegetal

3 Satélites de observación de la Tierra

Los satélites de observación de la Tierra varían en función del tipo de órbita que describen y en cuanto a los sensores: la resolución espacial, y las bandas espectrales. Todos esos parámetros se definen al principio de la misión, dependiendo de la aplicación a la que se vaya a destinar el satélite.

3.1 Tipos de órbitas

Hay dos tipos principales de órbitas en las que se colocan los satélites de observación de la Tierra:

a) Órbitas geoestacionarias

A unos 35.900 Km, un satélite que orbite sobre el ecuador está estacionario con respecto a la Tierra, volando siempre sobre el mismo punto, ya que el tiempo que se tarda en realizar una órbita completa es de 24 horas, lo que corresponde al tiempo de rotación de la Tierra.

Un satélite geoestacionario aporta por tanto la ventaja de que siempre ve la Tierra desde la misma perspectiva, por lo que puede registrar la misma imagen a breves intervalos de tiempo. Esto es particularmente útil para observar las condiciones meteorológicas. También tiene la ventaja, al estar en una órbita lejana, de que puede tomar una imagen completa de todo el disco de la Tierra (parte de la Tierra que se ve desde un punto del espacio).

El inconveniente de las órbitas geoestacionarias es la gran distancia a la Tierra, que reduce la resolución espacial que se puede lograr. Existen varios satélites meteorológicos distribuidos regularmente sobre la órbita geoestacionaria, cubriendo todo el mundo y proporcionando una visión global. También estas órbitas son empleadas por muchos satélites de telecomunicaciones, incluida la televisión.

Figura 13 Satélites en órbitas geoestacionarias

b) Órbitas heliosíncronas

Son órbitas polares o cuasi polares (casi pasan por los polos). Muchos satélites de teledetección están equipados con sensores pasivos que dependen de la iluminación solar. Al ir midiendo la reflexión de la luz solar procedente de la Tierra se deben ajustar sus órbitas al ritmo del día y de la noche. Esto es importante para poder comparar imágenes registradas a lo largo de un periodo de tiempo, para lo que las condiciones de luz deben ser lo más parecidas posible. Los registros deben tener lugar a la misma hora local del día para que el plano de la órbita del satélite debe permanecer a un ángulo constante a la luz del Sol. Estos requisitos pueden cumplirse situando el satélite en una órbita heliosíncrona.

Mientras el satélite avanza en su órbita, la Tierra gira sobre su eje. Cada vez que el satélite completa una vuelta se escanea una nueva franja de la superficie de la Tierra y, pasado un cierto número de vueltas, se habrá obtenido toda la superficie de la Tierra. Algunos satélites escanean una franja ancha cada vez y pueden de este modo cubrir la totalidad de la superficie de la Tierra en unas pocas vueltas. Por contra, los satélites de alta resolución que escanean sólo tiras finas tardan varios días en completar la cobertura de la Tierra.

Figura 14 Satélite en órbita heliosíncrona

3.2 Tipos de sensores

El dispositivo utilizado para adquirir imágenes se suele denominar "sensor". Una clasificación general de los sensores de observación de la Tierra se realiza atendiendo a la forma de "trabajar" para registrar la radiación electromagnética:

- **Sensores pasivos:** se llaman así porque no emiten ningún tipo de radiación. Solo capturan la información procedente de la radiación solar que refleja la Tierra o que emiten los propios objetos terrestres.
- **Sensores activos:** se llaman así porque emiten ellos mismos la radiación electromagnética que se refleja en los objetos y miden la energía que se devuelven reflejada al sensor (proceso de escaneo de la superficie terrestre)

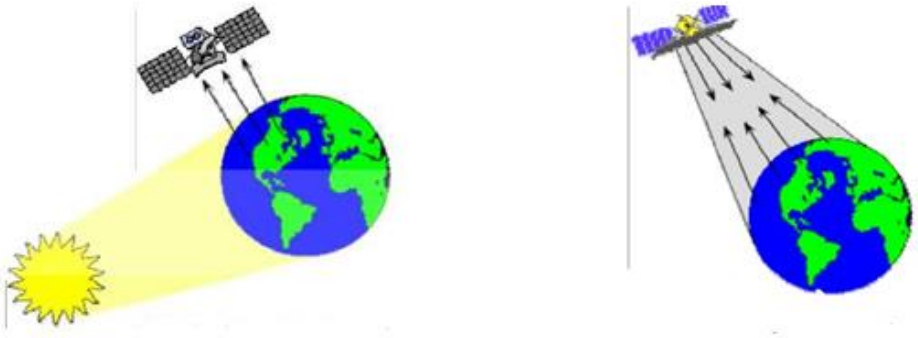

Figura 15 Tipos de sensores en teledetección

Los **sensores pasivos** se clasifican según del número de bandas o canales espectrales de las imágenes adquiridas:

- **Sensores pancromáticos:** capturan información en una sola banda, normalmente en el rango entre la radiación visible y el infrarrojo próximo. Las imágenes obtenidas se visualizan en escala de grises.
- **Sensores multiespectrales:** capturan información en varias bandas, asignando una banda para cada rango del espectro electromagnético del que pueden capturar información.
- Sensores hiperespectrales: cuando el número de bandas en el que capturan información es muy elevado, llegando a varias centenas, se habla de sensores hiperespectrales. Hoy en día son los menos

numerosos a bordo de satélites pero su número se está incrementando debido a la creciente demanda de este tipo de imágenes.

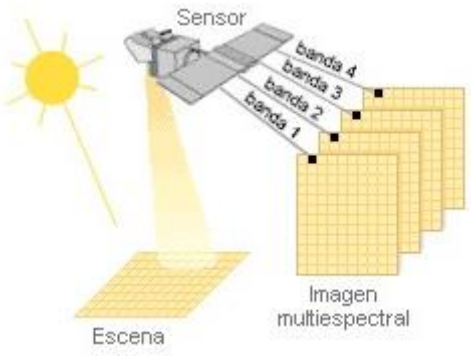

Figura 16 Formación de una imagen con sensor multiespectral

Los **sensores activos** se clasifican dependiendo de la longitud de onda en que trabajan. Para trabajos de teledetección se distinguen dos tipos de sensores activos:

- Sensores RADAR (*RAdio Detection And Ranging*) en el rango de las microondas.
- Sensores LiDAR (*LIght Detection and Ranging*) emite pulsos de luz láser entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano.

Los sensores LIDAR permiten obtener mayor detalle en la observación que los sensores RADAR porque trabajan con longitudes de onda más pequeñas pero, por el contrario, el láser no puede atravesar las nubes. Los sensores LiDAR no se suelen utilizar en teledetección espacial, y normalmente se colocan a bordo de aviones.

Los sistemas radar se verán con detalle más adelante en el tema de teledetección RADAR.

3.3 Principales misiones de observación de la Tierra

De acuerdo con los datos de la NASA a fecha de septiembre de 2018 existían alrededor de 4.000 satélites operativos orbitando la Tierra, de los cuales más de 100 estaban dedicados a la observación de la Tierra desde el espacio o **teledetección espacial** con distintos objetivos y escalas.

Aquí vamos a citar algunos de los más conocidos a nivel mundial para tener una idea global, aunque sabiendo que existen muchos otros. Podéis encontrar información sobre todas ellas en el siguiente sitio web:

https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/

3.3.1 El programa Landsat

Los Landsat son una serie de satélites construidos y puestos en órbita por Estados Unidos para la monitorización de la superficie terrestre. Todos con órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura,y con una inclinación de 98.2º respecto del Ecuador. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador lo hacen de Norte a Sur sobre las diez de la mañana hora local. Los Landsat están equipados con sensores específicos para la teledetección multiespectral en el rango óptico del espectro electromagnético.

El Landsat 1 se lanzó al espacio en 1972; el siguiente el Landsat 2 en 1975, el Landsat 3 en 1978, el Landsat 4 en 1982, el Landsat 5 en 1985, el Landsat 6 tuvo el lanzamiento fallido en 1993, el Landsat 7 en 1999, y el último de la serie por ahora, el Landsat 8, fue lanzado en febrero de 2013. Los dos últimos siguen en funcionamiento, adquiriendo imágenes con un tamaño de pixel de 30 metros (más un pancromático de 15 m) y un periodo de revisita de 16 días cada satélite y desfasados 8 días entre ellos.

Durante más de 47 años los satélites Landsat han adquirido información espectral de la superficie de la Tierra, creando un archivo de imágenes inigualable en todo el mundo en cuanto a antigüedad, continuidad, cobertura mundial y detalle.

Figura 17 Satélite Landsat 8

La NASA mantiene desde hace varios años una política de distribución gratuita de imágenes. Se pueden descargar a través del catálogo del USGS: http://earthexplorer.usgs.gov/.

3.3.2 El programa SPOT

Los Spot son una serie de satélites desarrollados por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia) para la monitorización de la superficie terrestre. Su órbita alrededor de la Tierra es heliosíncrona, casi polar y circular, a 822 km de altura.

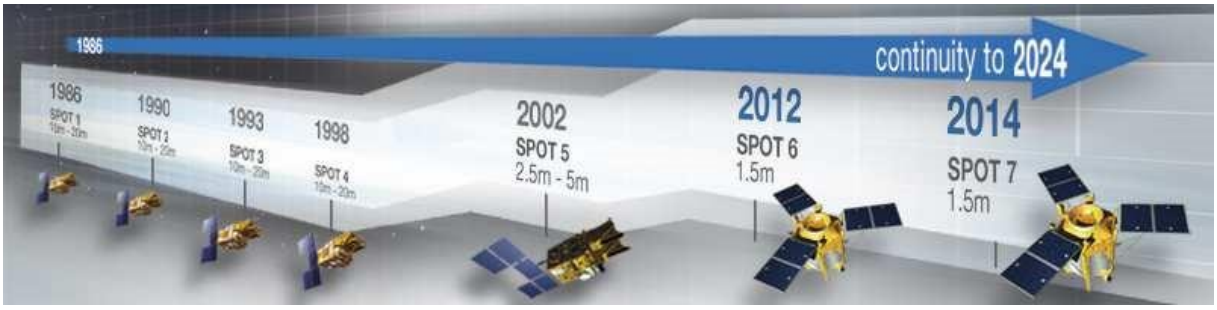

Figura 18 Sucesivos satélites SPOT

El Spot 1 se lanzó en 1986; Spot 5 en 2002, Spot 6 en 2012 y el último lanzado fue el Spot 7 en junio de 2014. Estos dos últimos siguen en funcionamiento, y conjuntamente permiten la observación diaria de prácticamente cualquier punto del globo terráqueo con una resolución de 1.5 metros.

El satélite SPOT 5, que se mantuvo en funcionamiento desde 2002 a 2015, capturaba 2 imágenes pancromáticas simultáneas con una resolución de 5 metros que convertían a 2,5 metros en postproceso e imágenes de 10 metros de resolución espacial con 3 bandas espectrales: Verde, Rojo, NIR, además de un SWIR de 20 metros.

Los satélites SPOT6 y 7 garantizan la continuidad de los productos de alta resolución hasta el año 2024, capturando imágenes pancromáticas con 1,5 metros de resolución espacial y multiespectrales con 6 metros y 4 bandas espectrales: Azul, Verde, Rojo, NIR.

3.4 Principales misiones de observación de la Tierra

GEO (Group on Earth Observations) es una **iniciativa a nivel mundial** cuyo objetivo es proveer a todos los países miembros con datos de observación de la Tierra de alta calidad, fácilmente accesibles, en tiempo real, y de forma continuada, así como sus metadatos y productos derivados que puedan aportar información para ayudar a los gobiernos en la toma de decisiones.

Como **iniciativa europea** más importante en cuanto a la observación de la Tierra hay que hablar del programa Copernicus, dentro del cual se están desarrollando la serie de satélites Sentinel.

- Los 2 satélites gemelos Sentinel 1 están equipados con un sistema RADAR a bordo. El Sentinel1A fue lanzado en abril de 2014 y el Sentinel 1B se lanzó un año después en abril de 2016. Capturan imágenes de la Tierra con distintos modos de adquisición, llegando a una resolución espacial de hasta 5x5 metros. Juntos alcanzan un periodo de revisita de hasta 6 días.
- Los 2 satélites gemelos Sentinel 2 que llevan a bordo un sensor óptico multiespectral con 13 bandas espectrales, 4 de ellas con 10 metros de resolución geométrica. El satélite sentinel 2A se lanzó al espacio en junio del 2015. Su gemelo, el sentinel 2B, se lanzó en marzo de este año 2017. Todavía está en fase pre-operativa. Cuando esté operativo, los dos satélites Sentinel2 proporcionarán imágenes cada 5 días en zonas cercanas al Ecuador y cada 2 a 3 días en latitudes medias.
- Los 2 satélites gemelos Sentinel 3 que van equipados con dos sensores ópticos que capturan imágenes con 21 bandas espectrales y 300 m de tamaño de píxel. Además llevan un altímetro para medir altitudes. El sentinel 3A ha sido lanzado en febrero de 2016 aunque la ESA todavía no distribuye las imágenes en su página web. Su gemelo, el sentinel 3B, está previsto lanzarlo a finales de este año 2017. Ambos capturarán una cobertura completa de la Tierra cada 2 días.
- Y los Sentinel 4 y 5 que están previstos para el 2020 y llevarán a bordo diversos instrumentos para medir la composición de la atmósfera.

Todos estos datos de la serie de satélites Sentinel están disponibles de forma gratuita a través del portal que ha habilitado la ESA (Agencia Espacial Europea) para su descarga:

https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

4 Procesamiento de imágenes multiespectrales

En este módulo vamos a explicar los distintos formatos que se utilizan para almacenar imágenes de satélite. También vamos a aprender a visualizar una imagen multiespectral en distintas combinaciones de color y vamos a ver los procesamientos, tanto geométricos como radiométricos que se aplican más habitualmente a las imágenes de satélite para obtener unos productos derivados utilizables por distintos usuarios para sus proyectos.

Existen muchos tratamientos que se pueden aplicar a las imágenes originales de partida, según la información que se quiera extraer de ellas, pero aquí vamos a estudiar los más generales que sirven para obtener unos productos destinados a un gran número de aplicaciones:

- Correcciones geométricas ó georreferenciación.
- Correcciones radiométricas: corrección atmosférica, equilibrados y relaces.
- Pansharpening.
- Mosaicos

4.1 Formatos y visualización

4.1.1 Formatos de imagen

Los formatos de fichero más utilizados para almacenar imágenes de satélite (imágenes raster multibanda que requieren tamaños grandes) son: los que se especifican a continuación:

- Formato **TIFF**: permite almacenar imágenes raster de hasta 4 GB de espacio de almacenamiento; y hasta 32 bits por píxel. Las imágenes se pueden almacenar sin compresión, comprimidas sin pérdidas (algoritmo LZW) o comprimidas con pérdidas (algoritmos: PackBits / CCITT G3y4 / RLE / JPEG / UIT-T). En teledetección se suelen almacenar las imágenes sin comprimir. La información sobre la georreferenciación de la imagen se almacena en un fichero de texto aparte con extensión TFW y otro con extensión .PRJ.
- Formato **GeoTIFF**: el mismo que el anterior, pero almacena la información de la georrefereanciación de la imagen en la cabecera del fichero.
- Formato **BigTIFF**: es una versión mejorada del formato TIFF. Permite almacenar imágenes mayores de 4 GB (hasta 143 Gb). Existe la variante GeoBigTIFF.
- Formato **ECW**: comprime las imágenes con poca pérdida de calidad. Reduce considerablemente el tamaño de los archivos, manteniendo una aceptable calidad visual y permitiendo una rápida compresión y descompresión. Utiliza un algoritmo “quad-tree”, que subdivide sucesivamente la imagen en cuadrantes. La información de la georreferenciación de la imagen se puede almacenar en la cabecera del archivo o en un fichero de texto aparte con extensión ERS.
- Formato **IMG**: Formato utilizado por el programa ERDAS para almacenar imágenes raster, pero bastante extendido y que pueden leer muchos otros programas.
- Formato **JPEG**: Técnica estándar de compresión para el almacenamiento de imágenes a color y en escala de grises. Es uno de los formatos más conocidos. Es uno de los pocos formatos que se soporta en Internet (Web). Almacena las imágenes comprimidas con pérdidas. Se puede escoger diferentes niveles de compresión: a más alta compresión menor calidad. Se puede optar por una compresión alta para crear archivos que ocupen poco espacio, que se usarán en la Web o para ser enviadas por correo electrónico. JPEG puede llegar a comprimir una imagen hasta sólo un 10 % de su tamaño original, sin que el ojo humano pueda percibir grandes diferencias. El teledetección se utiliza mayoritariamente para almacenar “quicklooks” o para publicar una imagen de satélite en

Internet. La información de la georreferenciación se puede almacenar en un fichero de texto aparte con extensión JGW y en un .PRJ.

- Formato **JPEG 2000**: formato que corrige los principales problemas del anterior. Está basado en la tecnología de compresión denominada "wavelet" que permite dos tipos de compresión: sin perdidas, donde no se pierde información de ningún píxel, o con pérdidas, similar al JPEG actual. La información de georreferenciación se puede incluir en la cabecera del fichero (con lo que tenemos el formato GeoJPEG2000).
- Formato **PNG**: Proporciona una buena compresión de archivos ráster sin pérdida de información. Permite almacenar transparencias en las imágenes.

4.1.2 Visualización de imágenes multibanda o multiespectrales

Las **imágenes multiespectrales** disponen de varias bandas donde se almacena información de diversas regiones del espectro electromagnético.

Los monitores y tarjetas de video disponen de 3 canales RGB: rojo, verde y azul. Por tanto puede utilizarse cada canal del monitor para representar los ND de una banda y obtener así una composición de color.

Por tanto, los datos multiespectrales se pueden representar por medio de composiciones de color o **combinaciones de tres bandas**.

En general, se trata de aprovechar que podemos visualizar tres canales a la vez para introducir las tres bandas que más nos van a ayudar a discriminar visualmente los elementos que nos interesan. Estas composiciones servirán entonces para resaltar los elementos que mayor variación de reflectividad presentan en las bandas utilizadas, además de obtener visualizaciones más o menos estéticas.

La denominación de las combinaciones de color puede variar de un autor a otro, pero generalmente se llaman "color natural" y "falso color infrarrojo" a dos de las combinaciones más utilizadas:

- Color natural consiste en combinar las bandas rojo, verde y azul del sensor, sacándolas por los canales RGB del monitor respectivamente.
- Falso color infrarrojo: consiste en combinar las bandas NIR, rojo y verde del sensor, enviándolas a los cañones R, G y B del monitor respectivamente. En esta composición de color la vegetación se visualiza en tonalidades de rojo y se utiliza para discriminar con mayor facilidad distintos tipos de vegetación, ya que en la banda 5 la vegetación posee alta reflectividad.

A continuación, pueden explicarse las distintas combinaciones de bandas utilizando una imagen del satélite Landsat 8.

Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Figura 19 Bandas del satélite Landsat 8

Las imágenes Landsat 8 están formadas por once bandas distribuidas como se muestra en la siguiente tabla. Las 9 primeras son adquiridas por el sensor óptico OLI (Operational Land Imager) con 30 metros de tamaño de píxel y las dos últimas son adquiridas por el sensor TIRS (Thermal INfrared) con un tamaño de píxel de 100 metros aunque se remuestrean a 30 metros para distribuirlas con el mismo tamaño de píxel que las demás bandas.

Según el trabajo que queramos realizar tendremos que combinar las diferentes bandas del modo más conveniente para nuestro proyecto. Algunas de las utilizadas trabajando con Landsat 8 según su uso son:

Figura 20 Combinaciones color natural (4-3-2) y falso color (6-5-4) de una imagen Landsat

En el siguiente cuadro se listan las combinaciones de bandas para los sensores más habituales en teledetección de recursos terrestres:

	Espectro electromagnético						
Satélite	**Coastal**	**Azul**	**Verde**	**Rojo**	**NIR**	**SWIR 1**	**SWIR 2**
Landsat 8	1	2	3	4	5	6	7
Sentinel 2	1	2	3	4	8	11	12

Tabla 1 Comparación de nomenclatura de bandas entre Sentinel 2 y Landsat 8

Teniendo en cuenta la información de la Tabla 1, la Tabla 2 nos proporciona la información necesaria para poder visualizar una misma imagen Landsat 8 o Sentinel 2 en diferentes combinaciones de bandas,

		Cañones del monitor		
	Satélite	**Rojo**	**Verde**	**Azul**
Color natural	Sentinel 2	4	3	2
	Landsat 8	4	3	2
Falso color (urbano)	Sentinel 2	12	11	4
	Landsat 8	7	6	4

Agricultura	Sentinel 2	11	8A	2
	Landsat 8	6	5	2
Penetración atmosférica	Sentinel 2	12	11	8A
	Landsat 8	7	6	5
Vegetación sana	Sentinel 2	8A	11	2
	Landsat 8	5	6	2
Tierra / Agua	Sentinel 2	8A	11	4
	Landsat 8	5	6	4
Color natural sin atmósfera	Sentinel 2	12	8A	3
	Landsat 8	7	5	3
Falso color (análisis de vegetación)	Sentinel 2	8	4	3
	Landsat 8	5	4	3

Tabla 2 Configuración de los cañones del monitor para visualizar diferentes combinaciones de color con Sentinel 2 y Landsat 8

4.2 Correcciones geométricas

La corrección geométrica de imágenes de satélite, habitualmente llamada **georreferenciación**, consiste en relacionar cada píxel de la imagen (fila y columna) con el punto de la superficie terrestre a que corresponde. Se creará una nueva imagen que conserve los valores radiométricos de la original, pero habiéndole aplicado una "transformación matemática" para adaptarla a un sistema de referencia espacial elegido por nosotros.

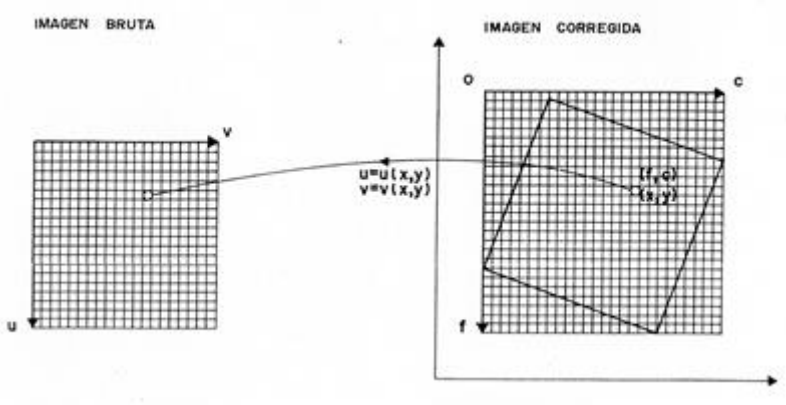

Figura 21 Proceso de corrección geométrica

4.3 Correcciones atmosféricas

Las anomalías provocadas por la atmósfera se deben a las propias moléculas gaseosas y a la presencia de partículas sólidas y líquidas en suspensión.

- **Dispersión:** produce una disminución de la radiación directa de la superficie terrestre que le llega al sensor y aumenta la radiación difusa procedente de la atmósfera.
- **Absorción:** produce una disminución de la radiación que le llega al sensor por ser absorbida por las moléculas gaseosas de la atmósfera.

Estos efectos, dispersión y absorción, pueden ser selectivos o no respecto a determinadas longitudes de onda.

La anomalía que se corrige es la dispersión, que provoca un aumento de la radiación detectada por los sensores. La absorción selectiva se tiene en cuenta a la hora de elegir las bandas en las que va a capturar información el sensor de cara a los distintos estudios posteriores.

Con la corrección atmosférica se pretende eliminar el efecto de dispersión de la atmósfera sobre la señal electromagnética registrada por los sensores, para obtener lo más certeramente posible las características de la superficie observada. La dispersión es una de las principales causas de bruma, lo que genera una disminución del contraste de la imagen.

Esta corrección es indispensable para determinados estudios donde se obtienen firmas espectrales de las cubiertas o parámetros biofísicos a partir de las imágenes. En estos casos, habrá que transformar primero los ND a valores de radiancia (significado físico) y después a valores de reflectividad TOA.

Existen varios métodos para realizar la corrección por atmósfera, pero hay que tener en cuenta que es muy difícil modelizar el comportamiento atmosférico puesto que la dispersión no es constante ni en el espacio ni el tiempo. Por lo tanto, cualquier método usado es aproximado.

También se han desarrollado métodos particularizados para ciertos sensores en función de las bandas en las que captura información.

La radiancia que llega al sensor es la suma de las siguientes componentes, tal y como se muestra en la Figura 22.

- La radiación procedente del Sol y la dispersada por la atmósfera sin llegar a la superficie (1).
- La radiación directa que atraviesa la atmósfera sin ser absorbida o dispersada, que alcanza el sensor después de haber sido reflejada por la cubierta (2).
- Radiación dispersada por la atmósfera que rebota en la cubierta y llega al sensor (3).
- Radiación directa o difusa reflejada o dispersada por las áreas circundantes al pixel de análisis (4 y/o 5). Esto es lo que se conoce como “efecto de adyacencia”.
- Radiación difusa proveniente de áreas circundantes que rebota en el pixel de estudio y se dirige al sensor (6).
- Radiación que incide en el pixel de análisis pero se dispersa en la atmósfera y vuelve a rebotar en el pixel de análisis, llegando en última instancia al sensor (7).

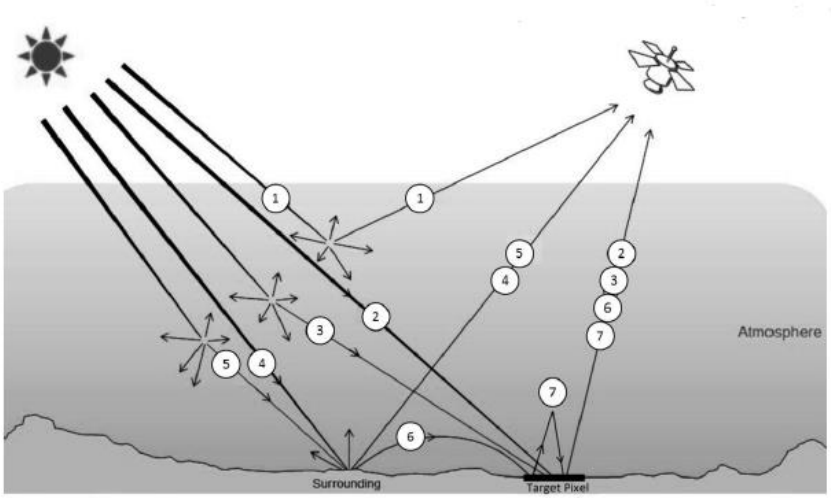

Figura 22 Perturbaciones atmosféricas de la radiación electromagnética (Mousivand et al., 2015)

4.4 Tratamientos radiométricos

Afectan a los ND de los píxeles y se realizan para mejorar la visualización de las imágenes: operaciones de realce, equilibrados radiométricos, filtrados, etc. Hay que tener en cuentas que con estas operaciones se "falsean" los ND de los píxeles, es decir, que se pierde parte de la información radiométrica que se utiliza para elaborar firmas espectrales.

- Equilibrados radiométricos.
- Mosaicado
- Realces o mejora del contraste.
- Filtrados.

4.4.1 Equilibrados Radiométricos

Cuando se trabaja con varias imágenes que han sido obtenidas en fechas distintas, poseerán una radiometría distinta debido a la variación en las condiciones atmosféricas, y esto hace que el aspecto y los colores no sean iguales visualmente para todas las imágenes. Los equilibrados radiométricos de realizan para igualar la radiometría de varias imágenes con una de referencia.

Se pueden consideran como un paso previo a la obtención de mosaicos de imágenes, aunque también se realizan equilibrados para calibrar series temporales de imágenes o para otras aplicaciones. El equilibrado radiométrico consiste en igualar las estadísticas (media y desviación típica) de las imágenes para que todas tengan un aspecto visual similar. Una de las imágenes se tomará como referencia para igualar la radiometría de las demás a la de esta.

El método más sencillo para igualar las estadísticas de una imagen a otra, y que funciona bastante bien, es mediante una transformación lineal. Para ello las imágenes a equilibrar deben poseer una zona de solape o recubrimiento de donde se obtienen las estadísticas, media y desviación típica, de ambas imágenes para cada banda y se calculan los coeficientes de la recta de transformación. Posteriormente se aplican las ecuaciones de esa recta a todos los ND de los píxeles de la imagen a equilibrar para igualar su radiometría con la otra.

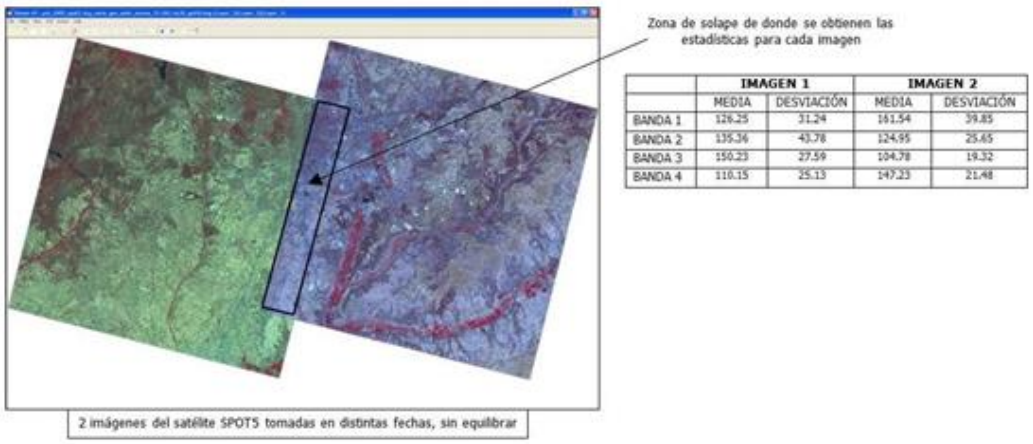

	IMAGEN 1		IMAGEN 2	
	MEDIA	DESVIACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN
BANDA 1	126.25	31.24	161.54	39.85
BANDA 2	135.36	43.78	124.95	25.45
BANDA 3	150.23	27.59	104.78	19.32
BANDA 4	110.15	25.13	147.23	21.48

Figura 23 Ejemplo de equilibrado radiométrico

4.4.2 Mosaicos

Es frecuente que las escenas de satélite no cubran la totalidad del área de estudio. En este caso se pueden adquirir escenas adyacentes y realizar un mosaico con todas ellas de forma que quede una imagen continua. Para ello habrá que ajustar previamente la radiomatería para que todas las imágenes tengan el mismo aspecto y a la hora de mosaicar no aparezcan saltos de color, este proceso conocido como equilibrado radiométrico es el que se ha explicado en un apartado anterior.

Todas las imágenes a mosaicar deben estar en el mismo sistema de referencia y poseer el mismo tamaño de píxel; además conviene que las imágenes posean la misma profundidad de bit.

Comparando las siguientes imágenes se puede ver un ejemplo de la importancia de realizar un equilibrado radiométrico a las imágenes que se desean mosaicar. En la imagen de la izquierda se puede ver un mosaico de la península ibérica realizado con imágenes procedentes del satélite SPOT5 de distintas fechas sin igualar la radiometría, todas ellas visualizadas en la combinación de bandas que ofrece un aspecto parecido al color natural. En la imagen de la derecha se puede ver el mismo mosaico pero habiendo aplicado un equilibrado previo a todas las imágenes, tomando como imagen de referencia (para igualar las estadísticas) una imagen del sensor MODIS que cubre toda la Península.

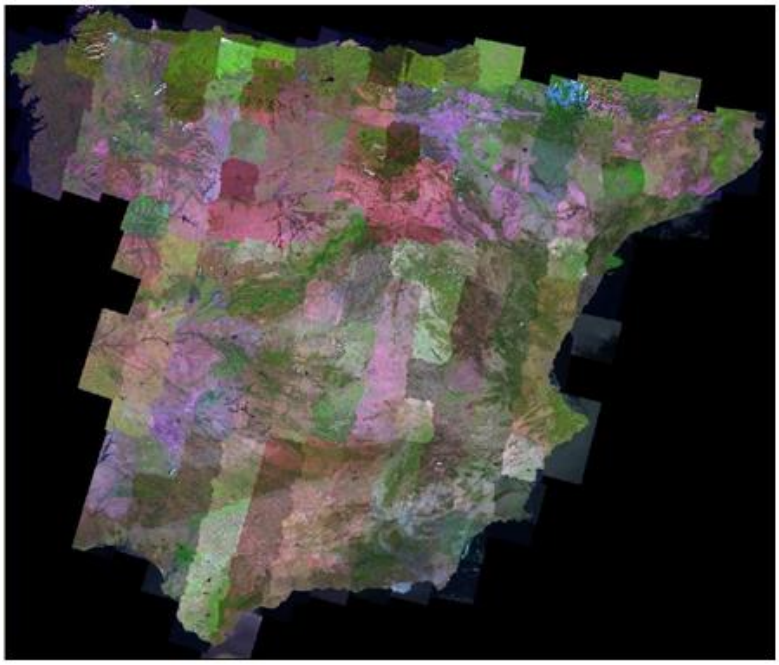

Figura 24 Imágenes SPOT 5 en bruto

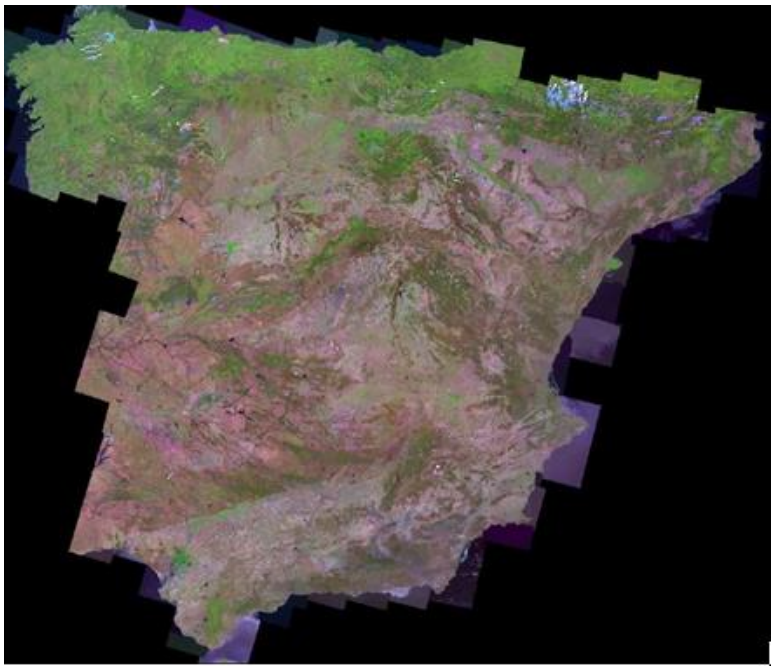

Figura 25 Mosaico de imágenes SPOT 5 equilibradas radiométricamente

4.4.3 Realces o expansión del histograma

El realce se aplica para producir un mejor aspecto visual, mediante una transformación del histograma de la imagen, que habitualmente implica mejorar el contraste de la imagen. Los realces se realizan píxel a píxel sin tener en cuenta los de alrededor. La modificación píxel a píxel, significará que para un valor ND de entrada le corresponderá un $ND_{modificado}$ de salida.

El histograma de una imagen es la representación gráfica (o en tabla) del número de píxeles asignado a cada nivel de gris o valor digital (ND) distinto en la imagen. La distribución de Niveles Digitales representada en el histograma aporta una información a partir de la cual pueden definirse estas operaciones de realce a nivel de píxel.

En la práctica, los realces se aplican modificando el histograma de las imágenes. La modificación o transformación más empleada en la expansión lineal del histograma para mejorar el contrate de la imagen.

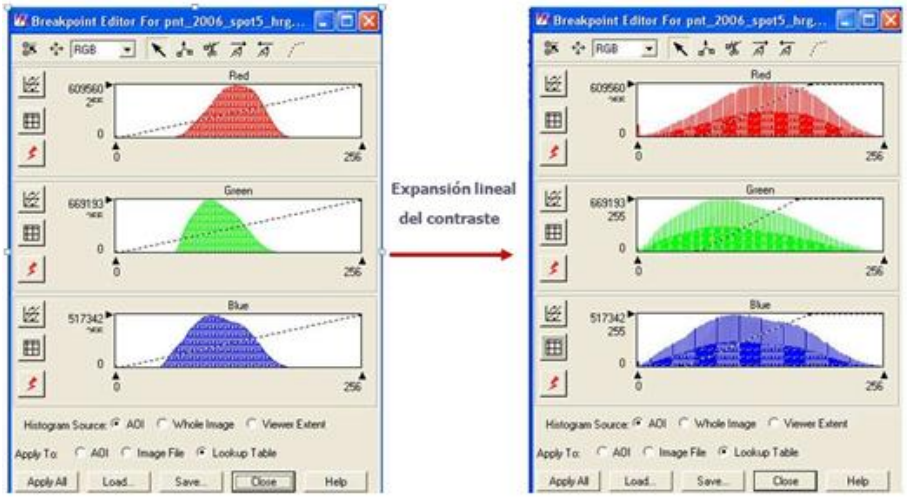

Figura 26 Ejemplo de expansión del histograma en una imagen con 3 bandas RGB

Los realces son de fácil implementación por los programas de tratamiento de imágenes, confeccionándose tablas de codificación o *Look Up Tables* (LUT), donde se establecen las transformaciones adecuadas.

Las siguientes imágenes de la isla de Mallorca, muestran el resultado de aplicar el proceso de realce anterior:

Figura 27 Imagen con valores ND originales, sin realzar

Figura 28 Imagen realzada, con valores ND modificados

4.4.4 Filtros

Los filtros se utilizan básicamente para destacar algunos elementos de la imagen. Consiste en aplicar a la matriz de pixeles de la imagen una matriz de filtrado "deslizante" (por ejemplo de 3x3 o de 5x5) que genera un nuevo valor mediante una media ponderada del valor original y el valor de los pixeles circundantes. Mediante diferentes combinaciones de los factores de ponderación se pueden conseguir diferentes efectos.

Los filtros más utilizados son:

- Los **filtros de paso bajo** que asignan a cada pixel el valor medio de los pixeles circundantes: efecto suavizado.
- Los **filtros de paso alto** para resaltar zonas de gran variabilidad: efecto realce de bordes

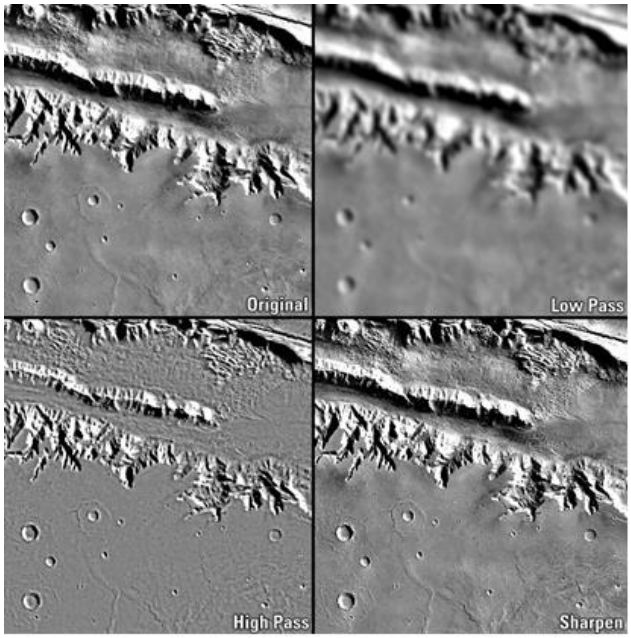

Figura 29 Ejemplos de filtro de paso bajo (arriba) y de paso alto (abajo)

4.4.5 Pansharpening

Existen muchos satélites de observación de la Tierra que llevan a bordo un sensor pancromático multiespectral, que capturan la misma imagen de la Tierra en el mismo instante, de forma que la banda pancromática es perfectamente superponible o coincidente con las bandas multiespectrales de la imagen. Por condiciones de diseño, los sensores pancromáticos poseen siempre mayor resolución espacial que los multiespectrales, es decir que proporcionan imágenes con menor tamaño de píxel, pero por el contrario capturan información en una sola banda que abarca un rango espectral más amplio que las multiespectrales.

La fusión o pan-sharpening es un producto derivado de las imágenes de satélite. Consiste en combinar las bandas multiespectrales de una imagen con su banda pancromática (capturada en el mismo instante que las multiespectrales), para mejorar la resolución espacial de las bandas multiespectrales extrayendo la información espacial que les falta de la banda pancromática.

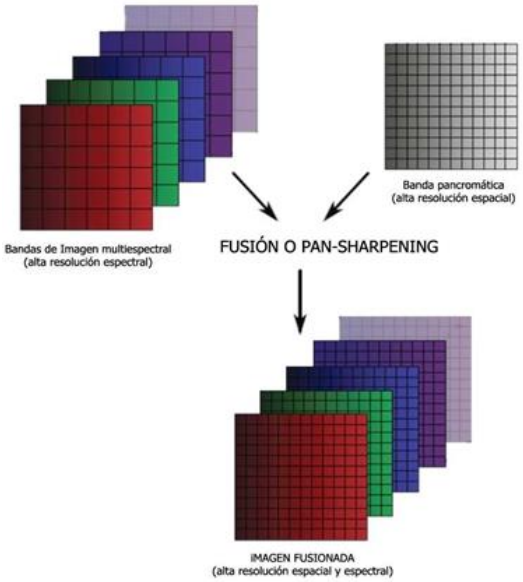

Figura 30 Flujo de trabajo en una operación de pansharpening

En el siguiente ejemplo se puede ver cómo mejora la calidad espacial de las bandas multiespectrales de una imagen SPOT al fusionarlas con la banda pancromática:

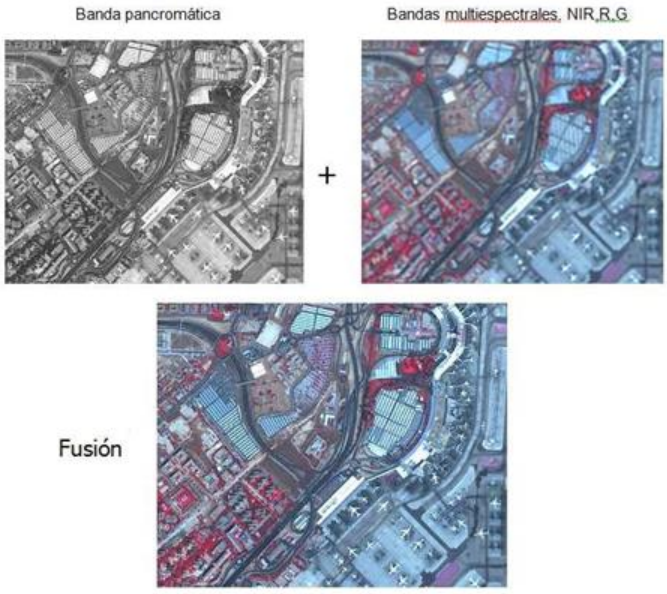

Figura 31 Pansharpening de una imagen SPOT

Hay que tener en cuenta que cuando se fusionan las bandas multiespectrales con la pancromática se gana en resolución espacial, pero se pierde calidad espectral en las bandas fusionadas.

Se han desarrollado muchos algoritmos para realizar fusiones, algunos genéricos que se pueden utilizar para cualquier tipo de imagen y otros específicos para las imágenes que capturan ciertos sensores.