

Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas. "Propuesta Metodológica"

DÁVILA MARTÍNEZ, FRANCISCO JAVIER
Instituto Geográfico Nacional
fjdavila@fomento.es

CAMACHO ARRANZ, ELENA
Instituto Geográfico Nacional
melena@fomento.es

Resumen.

La georreferenciación es un método que permite relacionar información de la posición entre documentos cartográficos de diversa procedencia. El objetivo del presente artículo es realizar una introducción a los aspectos fundamentales de la georreferenciación y mostrar las soluciones adoptadas por el Instituto Geográfico Nacional durante el proceso de escaneado de los fondos de la Cartoteca y del Archivo Topográfico.

Palabras clave.

Cartografía, Georreferenciación, sistemas de coordenadas, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

1. Introducción.

La georreferenciación o rectificación es un proceso que permite determinar la posición de un elemento en un sistema de coordenadas espacial diferente al que se encuentra. Existen por tanto dos sistemas de coordenadas: el sistema origen y el sistema destino. Este proceso es determinado con una relación de posiciones entre elementos espaciales en ambos sistemas, de manera que, conociendo la posición en uno de los sistemas de coordenadas es posible obtener la posición homóloga en el otro sistema. La georreferenciación se utiliza frecuentemente en los sistemas de información geográfica (SIG) para relacionar información vectorial e imágenes raster de las que se desconoce la proyección cartográfica, el sistema geodésico de referencia, o las distorsiones geométricas que afectan a la posición de los datos.

La georreferenciación queda definida por una función matemática del tipo:

$$X = f(x, y)$$
$$Y = f(x, y)$$

Donde la posición de una entidad geográfica en el sistema de coordenadas destino (X,Y) es función de las coordenadas (x, y) que tiene ese elemento en el sistema origen.

Para poder realizar una georreferenciación es necesario identificar sin lugar a equivocación puntos homólogos en los sistemas de coordenadas origen y destino, lo que permite calcular los parámetros de la transformación. Algunos de los factores que afectan a la calidad de la rectificación son el número de puntos homólogos identificados y la distribución de estos puntos en la superficie del mapa.

1.1. Métodos de georreferenciación.

Para realizar una buena georreferenciación es necesario identificar los mismos puntos en los documentos y obtener las coordenadas en los dos sistemas. Cuando se trata de rectificar un documento escaneado, las coordenadas origen corresponden a los valores de la fila y la columna en la imagen raster. Cuanto mayor sea el número de estos puntos, mejor y más precisa puede ser la transformación matemática que obtengamos, permitiendo estimar los errores previsibles en los cálculos.

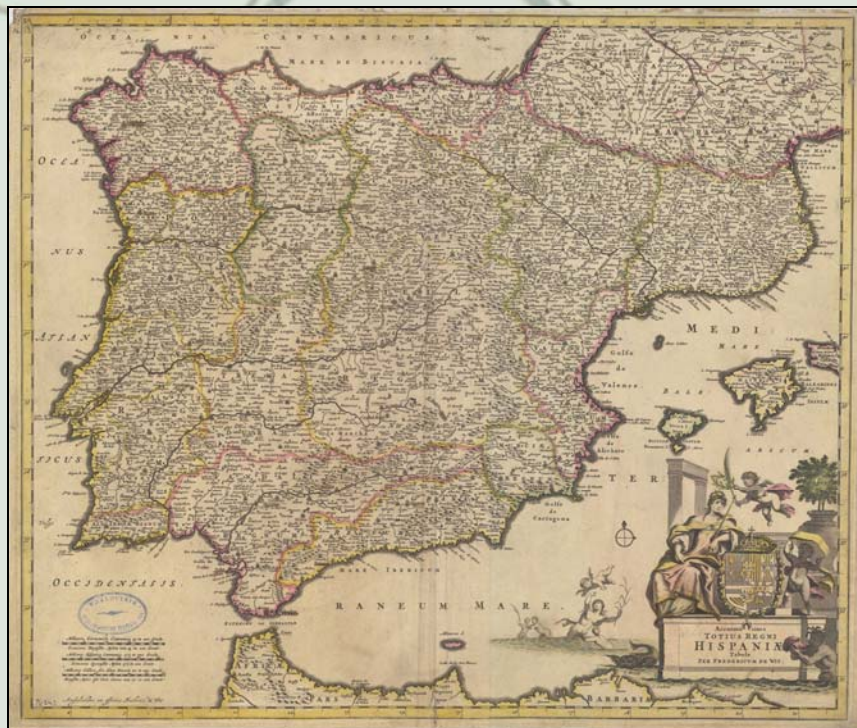
Santander 4-5 octubre 2012

Algunos de los nombres relacionados con estas transformaciones son los siguientes: transformación conforme, afín, o polinómicas. La transformación conforme está compuesta por una traslación según el eje X, otra en el eje de las Y, un giro y un cambio de escala. Una transformación de tipo afín permite calcular los mismos parámetros que la transformación conforme pero aplicando un cambio de escala diferente en el eje de las X y en el eje de las Y. La transformación polinómica de grado superior a dos permite corregir distorsiones e imprecisiones de manera más exacta a cambio de distorsionar la apariencia del documento para adaptarse mejor a la geometría.

Para determinar los parámetros de las transformaciones más sencillas suele ser suficiente de dos a cuatro puntos homólogos; la utilización de más puntos permite obtener una estimación de los errores. Las funciones polinómicas más complejas mejoran los resultados utilizando el mayor número posible de puntos. Las características que deben tener los puntos seleccionados para calcular la rectificación son las siguientes:

- Deben ser claramente identificables en todos los documentos. Si es posible, se deben seleccionar elementos en los que se supone que por sus características se ha dibujado con la máxima precisión; por ejemplo, es de esperar que la situación de un faro sea más exacta en una carta de navegación que un elemento alejado de la costa y que no es visible desde el mar.
- Los puntos deben corresponder con elementos fijos en el tiempo; por ejemplo, un banco de arena de una carta náutica es menos fiable que un islote de roca.
- Los puntos deben estar separados unos de otros y estar homogéneamente distribuidos en todo el mapa.

Figura 1. *Accuratissima totius regni Hispaniae tabula* de "Atlas Maior" de Frederick de Wit (1707).

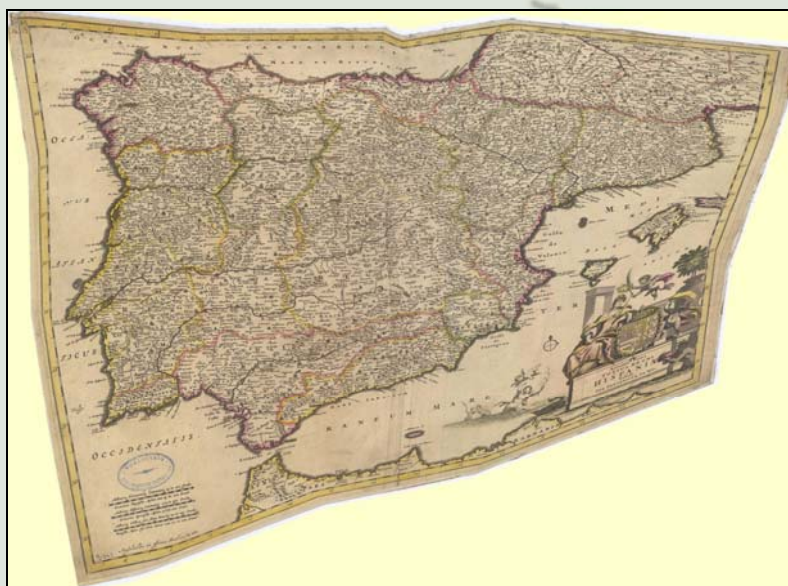


Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

1.2. Efectos de la georreferenciación en las imágenes.

Los SIG actuales permiten la visualización en pantalla de documentos georreferenciados sin que se produzcan distorsiones en la imagen; únicamente se transforman las coordenadas de manera interna al programa, de forma que cuando se intenta visualizar varios documentos al mismo tiempo o se almacena en alguno de los formatos habituales para imágenes, se producen deformaciones debidas a los cambios geométricos.

Figura 2. *Accuratissima totius regni Hispaniae tabula de "Atlas Maior" de Frederick de Wit (1707). Rectificación polinómica de segundo grado.*



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

Además de esta deformación geométrica, los programas realizan una operación denominada remuestreo, que es necesario realizar cada vez que se modifica la geometría de la imagen raster. Como resultado de ello se modifican los colores asignados a cada porción del mapa escaneado o píxeles; esto produce la reducción de la legibilidad y la calidad visual de los documentos. Los tres métodos de remuestreo más usados son: vecino más próximo, interpolación bilineal, y convolución cúbica. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes, pero a nivel general el método del vecino más próximo tiende a generar un efecto de dientes de sierra en las líneas, mientras que la interpolación bilineal difumina los contrastes. El que mejores resultados permite obtener con cartografía escaneada es el método de convolución cúbica. Es recomendable evitar realizar sucesivas operaciones de remuestreo con el objetivo de evitar la degradación de la imagen. Una opción que permiten los SIG para evitar los remuestreos sucesivos es rectificar la imagen escaneada en el momento que es solicitada por el usuario; esta opción permite georreferenciar el resultado a cualquier sistema de coordenadas, pero es más lenta a nivel informático.

Como resultado de la georreferenciación, el documento obtenido puede aparecer con un efecto difuminado o borroso en comparación con el documento original. Se puede plantear escanear los documentos a mayor resolución de la prevista en la imagen final, reduciendo así la degradación de la calidad. Como efecto de las modificaciones geométricas, los textos pueden tener deformaciones que dificulten su lectura.

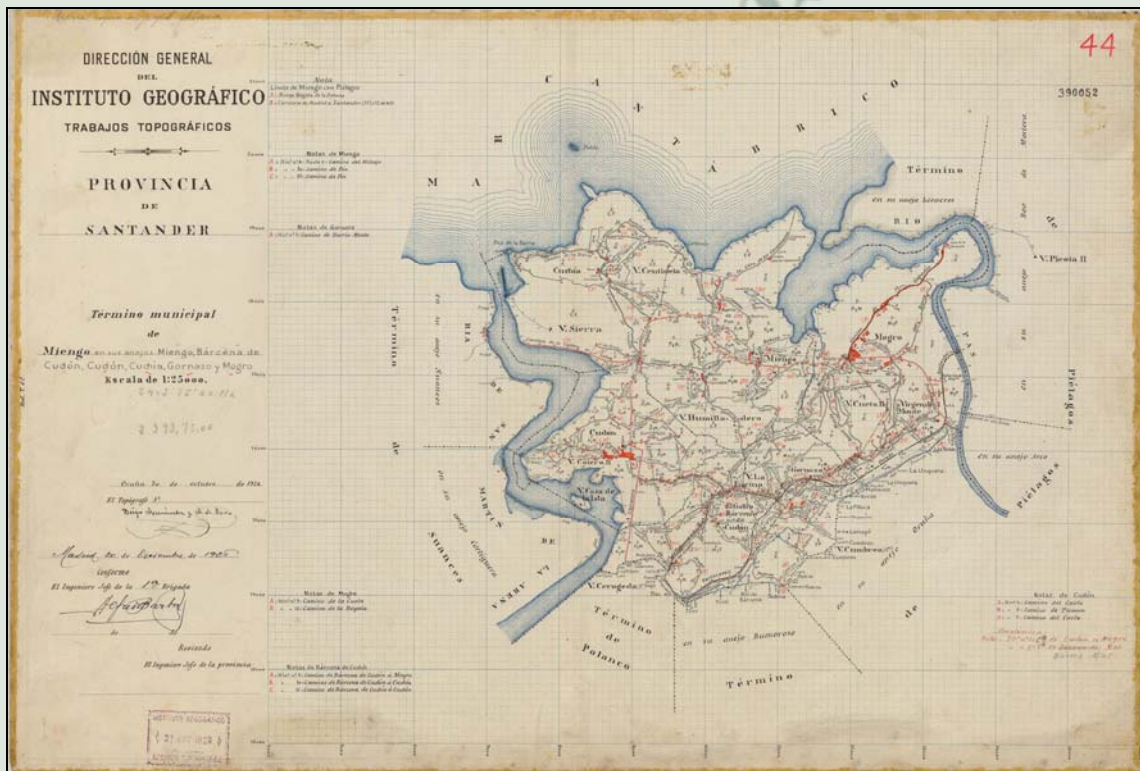
1.3. Características especiales de los documentos.

El objetivo de la georreferenciación de documentos de cartografía antigua es corregir una serie de problemas que producen errores en la posición de los elementos geográficos. En algunos casos de cartografía antigua, no es posible identificar el modelo geométrico de Tierra o la proyección cartográfica utilizada para obtener el mapa. Por otro lado, existen errores y deformaciones en el papel original que producen que la escala no sea la misma en todas las direcciones, ni en todo el documento; este problema se puede ver incrementado cuando al digitalizar el documento no se han utilizado equipos apropiados.

Además hay que añadir los errores geométricos propios de los instrumentos y las técnicas que se utilizaron en su época para realizar el mapa. A nivel general podríamos considerar dos tipos de mapas a la hora de georreferenciar cartografía antigua:

- En primer lugar, los documentos en los que en su realización se puede suponer que por la finalidad del mapa se utilizaron métodos y técnicas que garantizan una precisión homogénea. En este tipo de mapas puede conseguirse una buena georreferenciación identificando tres o cuatro puntos homólogos. Para poder identificar estos documentos es conveniente poder disponer de información de cómo se realizó el proceso cartográfico. (Figura 3)

Figura 3. Planimetría de Miengo en sus anejos de Miengo, Barcena de Cudón, Cudón, Cuchí, Gornazo y Mogro, IGN (1926).



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

- Por otro lado, los mapas en los que la utilidad, finalidad, medios técnicos, o métodos utilizados en su realización no garantizan una precisión geométrica homogénea en toda la mancha del mapa¹. Para obtener una rectificación de calidad de este tipo de documentos es necesario un número elevado de puntos homólogos, por lo que su georreferenciación precisa necesita mucho trabajo y es poco práctica a la hora de gestionar los fondos de una cartoteca o archivo. Por ello, puede ser recomendable una georreferenciación sencilla basada en la identificación de únicamente dos puntos homólogos; de esta manera, se evitan deformaciones en la imagen resultante. En el ejemplo de la Figura 1 se puede observar una serie de errores y problemática usual en este tipo de documentos:
 - Hasta el siglo XVIII no se pudo determinar la longitud con facilidad y precisión, por lo que la cartografía histórica suele tener un error mayor en longitud que en latitud.
 - Existen errores en la toponimia del documento. La ciudad de Santander aparece en el mapa con el nombre de S. Andreo.
 - En el documento no aparece información, o es inexacta, sobre aspectos geométricos como la escala, proyección, tamaño y dimensión de la Tierra, etc.

¹ Mancha cartográfica, corresponde a la zona del mapa donde se representa los elementos geográficos. Suele estar limitado por el marco.

- o Errores introducidos de manera consciente o inconsciente por el cartógrafo por razones militares, políticas o culturales. Se observa que existe más detalle en la información que aparece en la Península y en las islas Baleares que en la costa de África.
- o En el soporte original se observan pliegues y deformaciones.

2. Propuesta metodológica.

Las metodologías que se presentan a continuación corresponden a los procesos de georreferenciación realizados en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) para algunos de los documentos disponibles en sus fondos. Se distinguen cuatro tipos de documentos que por sus características se georreferencian de manera diferente:

- 1) Planos de edificios singulares. Estos documentos son de escala variada; todos ellos están orientados al norte.
- 2) Cartografía antigua o histórica de diversa procedencia con precisión heterogénea o de la que se desconocen datos importantes relativos a su geometría.
- 3) Documentos correspondientes a series cartográficas nacionales como el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 (MTN50), o que siguen una distribución en hojas con manchas cartográficas aproximadamente rectangulares o cuadradas como las Hojas Kilométricas (HK) de 1860. Todos los documentos de cada una de estas series tienen una calidad geométrica similar.
- 4) Documentos en los que se han seguido sistemas de observación y medida que garantizan una homogeneidad en la precisión geométrica, como las Planimetrías, pero donde la mancha cartográfica está encerrada en formas irregulares como los límites municipales.

La finalidad de la georreferenciación de los documentos del IGN es facilitar la búsqueda de información utilizando los SIG de gestión de la Cartoteca y del Archivo, si bien no persigue la localización exacta de los elementos geométricos representados en cada mapa. Por otro lado, se ha procurado evitar las distorsiones y deformaciones que impidan la legibilidad de los documentos georreferenciados. Se ha dejado la tarea de la georreferenciación exhaustiva y precisa a la labor de los investigadores. El resultado final de los trabajos ha sido obtener las coordenadas que permiten calcular la rectificación de las imágenes, las imágenes rectificadas, y en algunas de las series se han recortado los mapas por el límite de la mancha para producir mosaicos.

2.1. Selección de la transformación.

En esta fase del proceso hay que decidir el método de transformación más adecuado; esto puede venir impuesto por las características de los documentos cartográficos y por el volumen de documentos a rectificar. Los métodos seguidos están condicionados por el número de puntos homólogos que se van a identificar:

- 1) El método más sencillo utilizado en la georreferenciación de la información del IGN corresponde a los planos de edificios, donde se ha utilizado un único punto de referencia que corresponde con algún elemento singular del edificio, por ejemplo, una esquina fácilmente identificable en otro documento cartográfico. La orientación respecto al norte queda resuelta al escanear el documento orientado. El valor de la escala se ha introducido utilizando el valor indicado en el documento original. Los documentos son transformados con dos traslaciones y un cambio de escala determinado por el valor numérico que aparece en la información marginal.
- 2) Los documentos correspondientes a cartografía histórica se rectifican únicamente con dos puntos que cumplan las características definidas para los puntos homólogos; con ello se pretende no distorsionar las imágenes escaneadas. Para garantizar que exista solape suficiente en la realización de consultas en la base de datos, los mapas de este tipo no han sido recortados por el límite de la mancha cartográfica. La transformación aplicada está compuesta por un giro, dos traslaciones y un cambio de escala.
- 3) Los mapas que pertenecen a series que disponen de una distribución regular en hojas han sido georreferenciados utilizando las cuatro esquinas del marco². Algunos documentos han sido recortados por el marco para poder realizar mapas continuos de toda la serie cartográfica; por ejemplo: la primera edición del MTN50. El método de rectificación elegido es el polinómico de segundo grado, ya que obtiene resultados correctos al casar los documentos en el mosaico continuo.

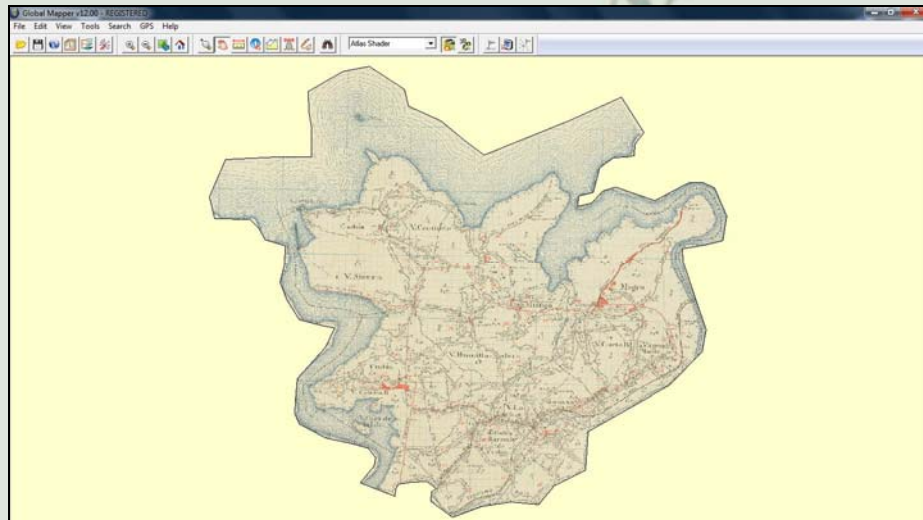
² Marco es la zona de geometría regular que limita la mancha cartográfica; puede llevar algún tipo de graduación o sistema de coordenadas.

- 4) Para rectificar las Planimetrías a escala 1:25.000 se han seleccionado cuatro puntos identificables en los documentos. Estos puntos se han seleccionado siguiendo los criterios expuestos para los puntos homólogos. Por las características de estos documentos, ha sido complicado localizar estos cuatro puntos en zonas sin referencias geográficas importantes, como zonas rústicas y despobladas. Se ha digitalizado la línea que limita la mancha cartográfica, permitiendo la posibilidad de recortar el documento según esa línea. El método de rectificación elegido es el afín, compuesto por un giro, dos traslaciones y un cambio de escala por cada eje.

Santander 4-5 octubre 2012

En cada caso se ha tomado una decisión de compromiso entre las necesidades de precisión de la georreferenciación y el trabajo necesario para obtener esta precisión.

Figura 4. Planimetría de Miengo y sus anejos georreferenciada y recortada, IGN (1926).



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

2.2. Identificación de puntos homólogos.

Este proceso consiste en la obtención de las coordenadas de los puntos en un sistema de coordenadas y en otro. El mayor problema en este apartado ha sido la localización de puntos homólogos en zonas rústicas, de mar o sin elementos destacables.

Para realizar todo el proceso es necesario identificar los puntos homólogos en el documento que se quiere rectificar y las coordenadas geográficas en algún sistema de proyección de estos puntos; para esto, suele ser habitual utilizar cartografía o bases de datos que dispongan de información posicional de mayor precisión. En el caso de los trabajos del Instituto Geográfico Nacional se han utilizado las siguientes informaciones:

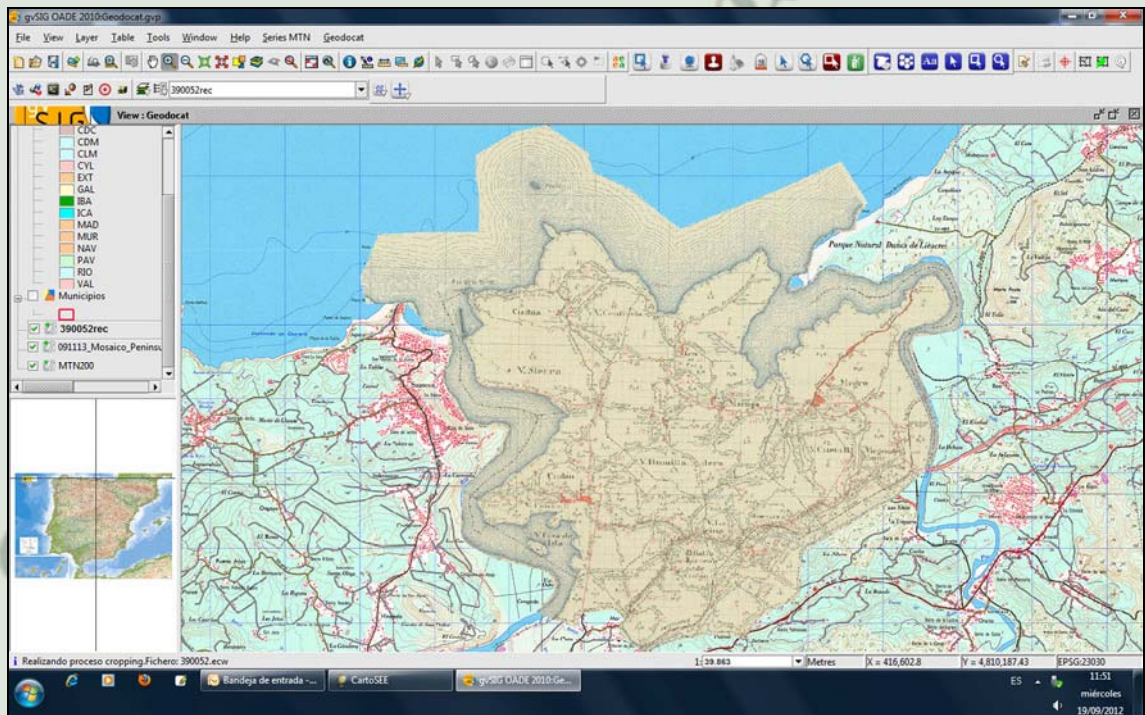
- 1) Las coordenadas del punto singular de cada edificio se ha obtenido del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 (MTN25) previamente rectificado. Para el caso de los edificios que en la actualidad no existen se ha utilizado el MTN50 georreferenciado, donde sí aparecen estos edificios.
- 2) Los mapas históricos se han rectificado utilizando la cartografía y bases de datos correspondientes a escalas 1:200.000, 1:500.000 y 1:1.000.000, y en algunos casos las coordenadas obtenidas de Google Earth.
- 3) Las hojas correspondientes a los MTN25 y MTN50 se han georreferenciado utilizando las coordenadas de las cuatro esquinas, que es un dato conocido a priori. Las HK se han georreferenciado utilizando como base los planos directores de cada municipio.
- 4) Para las planimetrías se han buscado las coordenadas en los MTN50 de la primera edición georreferenciada, mediante la localización de cuatro puntos singulares, tales como edificios aislados, torres de iglesias y otras referencias visuales que puedan haber sido utilizadas en la confección del plano.

Como se deduce de lo anterior, primero se rectificaron las series MTN25 y MTN50 y se utilizaron estas fuentes para georreferenciar el resto de documentos. MTN25 y MTN50 utilizan la proyección cartográfica

UTM³; para evitar los problemas que ocasionan los cambios de huso se utilizó la proyección en el huso 30 extendido para la Península y Baleares. El sistema geodésico utilizado fue el oficial en su momento European Datum 1950 (ED50) para las islas Baleares y la Península, y REGCAN para las islas Canarias. En proyectos futuros está previsto convertir todos los documentos al sistema geodésico oficial actual (ETRS89). Los pares de coordenadas de los puntos utilizados se almacenaron en su momento, por lo que es posible obtener de nuevo los parámetros de transformación que se utilizaron.

Una vez finalizado el proceso, es necesario comprobar el resultado de la rectificación. Para ello se visualizaron todos los documentos en un SIG, comparando el documento final con la información previamente validada.

Figura 5. CartoSee⁴ Planimetría de Miengo y sus (1926) y MTN25 (IGN).



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

3. Conclusiones.

Para realizar la georreferenciación de un mapa, el conocimiento a priori de la calidad geométrica de la información geográfica que aparece en el documento, permite seleccionar el proceso más adecuado, diferenciando métodos distintos para los documentos en los que las geometrías representadas tienen una precisión homogénea y en los que la precisión es heterogénea o desconocida. Cuando la precisión es homogénea, es posible plantearse transformaciones sencillas que requieran poco trabajo y obtengan buenos resultados, tanto en precisión como en aspecto visual. Cuando los documentos no tienen una precisión homogénea, es necesario recurrir a transformaciones polinómicas de grado dos o superior para mejorar la precisión. Una rectificación polinómica de este tipo es, desde el punto de vista geométrico, más precisa que el resto de métodos, si bien cuando se trata de la gestión de cartografía antigua, quizás, no sea la más adecuada; en primer lugar porque necesita de un trabajo adicional para identificar muchos puntos homólogos y por otro lado, porque el resultado puede tener distorsiones excesivas que impidan la legibilidad. Por ello es preciso tener en consideración los recursos disponibles y la finalidad del documento obtenido para realizar este tipo de transformación.

La georreferenciación de documentos produce una reducción de la calidad de la imagen debida al remuestreo de los píxeles. Para reducir este efecto, es conveniente disponer de una resolución de

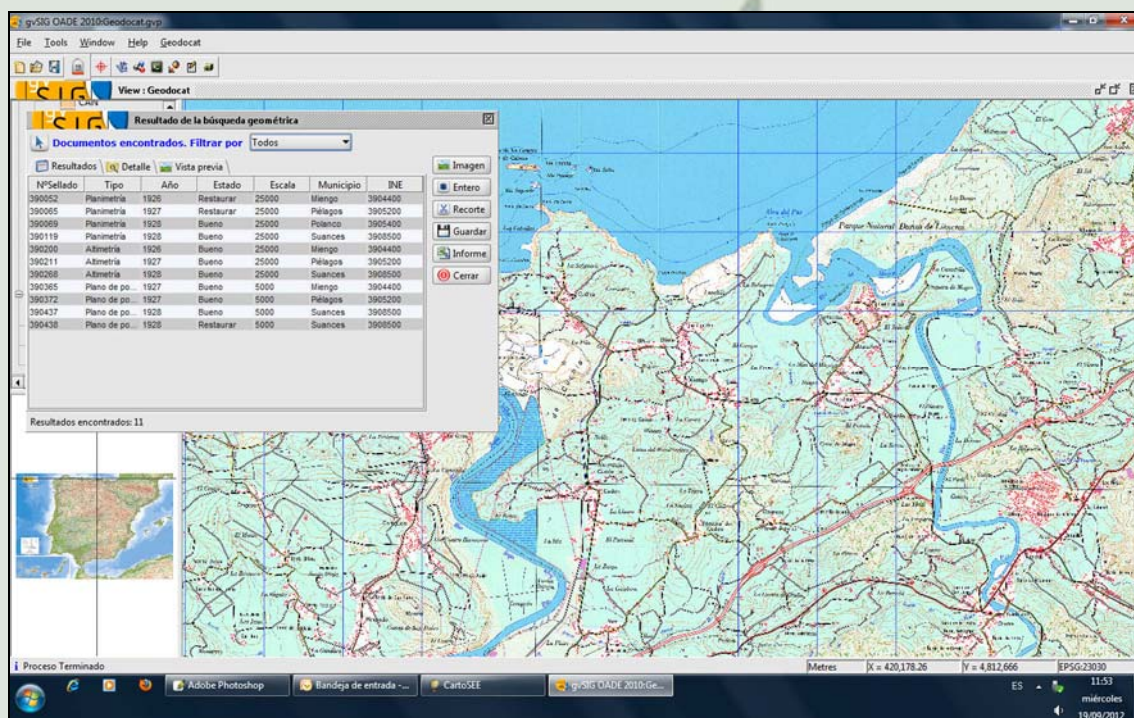
³ UTM es el sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator. Se trata de una proyección que conserva las formas y que divide la superficie de la Tierra en 60 husos de 6° longitud cada uno.

⁴ CartoSee Sistema de Información Geográfica de gestión de información cartográfica.

escaneado inicial suficientemente alta para garantizar la calidad del documento final. Por otro lado no es conveniente realizar rectificaciones sucesivas, ya que aumentan el efecto negativo del remuestreo. Una opción es georreferenciar el documento cada vez que se visualiza, permitiendo así visualizar el documento en distintos sistemas de coordenadas y proyecciones cartográficas, si bien tiene el inconveniente de ser un proceso lento.

El resultado de cualquier georreferenciación puede ser siempre mejorado, ya que se pueden seleccionar más puntos homólogos, aumentar el grado del polinomio utilizado, utilizar técnicas como los mínimos cuadrados para la gestión de errores, etc., pero cuando el volumen de documentos es muy grande y la finalidad de la georreferenciación es la gestión de información en una cartoteca o en un archivo, parece aconsejable no recurrir a métodos que consuman grandes recursos y cuyo resultado final deforme la imagen o ralentice los procesos de búsqueda, dejando para trabajos de investigación concretos la realización de georreferenciaciones precisas.

Figura 6. CartoSee Resultado de los documentos cartográficos realizada por análisis espacial.



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. Elaboración Propia.

Bibliografía

BOWRING, B.R., (1976): "Transformation from spatial to geodetic coordinates". Survey Review, 23: 323-327.

BURROUGH, P.A., McDONNELL, R, (1998): "Principles of geographical information systems". Spatial information systems. Oxford University Press, Oxford ; New York, xiii, 333 pp.

CAPDEVILA I SUVIRANA, J., HARLEY, J. B., (2002): "The new nature of maps: essays in the history of cartography". Biblio 3W. Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales. Universidad de Barcelona. VII, nº 404, 15 de octubre 2002.
<<http://www.raco.cat/index.php/Biblio3w/article/view/66718/76953>> [08/09/2012]

CHUVIECO, E. (1996): "Fundamentos de Teledetección espacial". Madrid, Rialp.

DALDA, A. y GONZÁLEZ-MASTESANZ, J., (2001): "Parámetros de transformación entre sistemas de referencia". Jornadas Técnicas sobre Topografía, Cartografía, Fotogrametría, Geodesia y Teledetección. Escuela de Arquitectura Técnica. Universidad de Alcalá, pp. 189-229.

DIRECTIVA 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007, por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (INSPIRE). *Diario Oficial de la Unión Europea*, nº L108, de 25 de abril de 2007.

GONZÁLEZ-MASTESANZ, J. (2004): "Grid estimation. Application to datum distortion modelling". 1st European Workshop on Reference Grids European Commission, JRC Milan. Santander 4-5 octubre 2012

GONZÁLEZ-MASTESANZ, J. y DALDA, A., (2002): "Estrategias para la transición de datum ED50-ETRS89". III Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (en CD), Valencia.

Instituto Geográfico Nacional (1918). Red geodésica de primer orden de España. Talleres del Instituto Geográfico y Estadístico, 116 pp.

JUNKINS, J. y GARRAND, G., (1998): "Demystifying reference systems". *Geomatica* (Canadian Institute of Geomatics), 52(4).

LEY 14/2010, de 5 de julio, sobre las infraestructuras y los servicios de información geográfica en España. *Boletín Oficial del Estado*, nº 163, de 6 de julio de 2010.

MARTÍN LÓPEZ, J. (2002): "*Historia de la Cartografía y de la Topografía*". Madrid, Ministerio de Fomento, Centro Nacional de Información Geográfica.

MENA BERRIO, J. (1997): "Teoría del tratamiento matemático de las mediciones experimentales". Servicio Geográfico del Ejército, Madrid, 11, 396 pp.

MITSAKAKI, C.: "Coordinate Transformations".
<http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts07/ts07_2_mitsakaki.pdf> [8/09/2012]

MORENO G., CORTÉS, J. (2011): "La exactitud posicional de la cartografía histórica". Revista PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Año 19, n. 77 Especial Monográfico. Sevilla, Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, pp. 62-65.

SEGURA I MAS, A. (coord.), (1988): "*El Catastro en España*". Barcelona, Lunweg Editores.

SELLÉS, M. A. (2000): "Las etapas de la navegación hasta la resolución del problema de la longitud", en Catálogo de la exposición *De la Aguja Náutica al GPS*. Madrid, Ministerio de Fomento, Centro Nacional de Información Geográfica, pp. 41-54.

SELLÉS, M. (1994): "El problema de la longitud", en *Instrumentos de navegación. Del Mediterráneo al Pacífico*. Barcelona, Lunweg Editores, pp. 109-138.

RUMSEY, D., MEREDITH, W.: "Historical Maps in GIS".
<http://www.davidrumsey.com/gis/ch01.pdf> [03/09/2012]

VAYSSIÈRE, B. H., et al., (1980): "Errer est humain", en *Cartes et figures de la Terre*. París, Centre Georges Pompidou, pp. 163-215.

VAZQUEZ MAURE, F., MARTÍN LÓPEZ, J. (1989): "*Lectura de Mapas*". Madrid, Ministerio de Obras Públicas, Instituto Geográfico Nacional