

Georreferenciación de cartografía antigua para la web del Servicio de Cartografía de la Universidad Autónoma de Madrid

Carlos Almonacid Ramiro¹
Universidad Autónoma de Madrid

Resumen

La georreferenciación de cartografía antigua ha de ser un proceso gradual en el que los primeros resultados mantengan la geometría y el sistema de referencia del documento original para permitir su aná-

lisis cartográfico y posicional. Si se utilizan deformaciones incoherentes con el proceso cartográfico de creación del mapa, estos análisis quedarán comprometidos. Solo en versiones posteriores, se utilizan ajustes y deformaciones más intensas con las que adaptarse a las posiciones recogidas en la cartografía actual cuando otro tipo de aplicaciones así lo exigen. En el procedimiento descrito, la identificación del sistema de referencia original del mapa y la reconstrucción numérica de su malla geográfica de meridianos y paralelos son fases ineludibles.

¹ Servicio de Cartografía de la Universidad Autónoma de Madrid (SCUAM). Este artículo tiene su origen en textos que se encuentran en <http://guiadigital.uam.es>. Los visores cartográficos alojados en esa misma dirección web ofrecen la visualización de cartografía antigua sobre la que se ha venido aplicando esta metodología. Se enmarca en el proyecto de I+D+i PID2019-106735GB-C21 del Ministerio de Ciencia e Innovación (AEI / 10.13039/501100011033), titulado: *Avanzando en el conocimiento del Catastro de Ensenada y otras fuentes catastrales: nuevas perspectivas basadas en la complementariedad, la modelización y la innovación.*

Palabras clave: Georreferenciación, Mapas antiguos, Cartografía en la web, Ajustes y deformaciones, Malla geográfica.

Georeferencing of old cartography for the Web of the Cartography Service of the Autonomous University of Madrid

Abstract

Positional accuracy and cartographic analysis are only feasible for ancient maps when their georeferencing process keeps the original map geometry and reference system. This kind of analysis would not be achieved when using deep deformations to force the fitting of the ancient maps into current cartography points. Strong adjustments, like rubbersheeting using current positions, may be done later on if required for other objectives. Identifying the original reference system and rebuilding mathematically the geographical grid of the ancient map are unavoidable processes.

Key Words: *Georeferencing, Ancient maps, Web mapping, Adjustments and deformations, Geographical grid.*

La digitalización de los mapas antiguos permite su integración con las tecnologías de información geográfica actuales. Las herramientas propias de la cartografía digital facilitan el análisis comparativo de los mapas antiguos con otras fuentes cartográficas históricas o actuales y permiten rastrear los procesos de su construcción. Por otra parte, la comparación de los diversos mapas históricos aporta un valioso material para los análisis sobre la evolución del territorio y para la observación de los avances en el conocimiento de la tierra a lo largo de la historia. Además, desde el ámbito de la cartografía, interesa especialmente analizar la evolución histórica de los propios mapas, de los recursos gráficos utilizados para su trazado, los elementos representados en ellos, o la calidad de sus datos de posicionamiento.

Pero el manejo de la cartografía antigua digitalizada con las tecnologías cartográfi-

cas actuales no es inmediato. Las herramientas digitales adquieren todo su sentido cuando las imágenes digitales de los mapas pasan a estar georreferenciadas, es decir, posicionadas en un sistema de coordenadas expresamente legible por el software cartográfico.

Todo documento cartográfico, por arcaica que sea su construcción, es susceptible de ser georreferenciado en algún sistema de coordenadas manejable por el software actual, pero se debe tratar de hacerlo manteniendo las transformaciones y deformaciones aplicadas dentro de un rango controlable. Cuando los mapas antiguos hayan sido construidos mediante técnicas basadas en la cartografía matemática, por simple que esta sea, podremos intentar reconstruir su sistema de referencia original en la nueva asignación de coordenadas digitales. De este modo, el documento original se mantendrá con su geometría intacta, o mínimamente deformada, tras el proceso de georreferenciación. Si, por el contrario, utilizáramos deformaciones incoherentes con el proceso cartográfico de creación del mapa, impediríamos la realización de algunos de los análisis que más nos interesan desde el punto de vista de la historia de la cartografía, como el del desarrollo de los métodos de posicionamiento o la evolución de la precisión en la captura de datos.

Cuando se plantee el manejo de otros viejos mapas alejados de la cartografía científica, carentes de sistemas de proyección reconocibles o, incluso, de referencias a coordenadas geográficas, será prácticamente imposible la reconstrucción de su sistema de referencia original dentro de los cánones matemáticos manejados por la georreferenciación digital. En estos casos, se podría optar por una georreferenciación aproximada, que simplemente llegue a situar cada mapa en el espacio representado en él, manteniendo la geometría original del documento. También cabría intentar

una georreferenciación más ajustada, deformando distintas partes del mapa para adaptarlo a una serie de puntos de control identificables en él y de los que se conozcan sus coordenadas actuales. Este último tipo de georreferenciación llevará los mapas a un sistema de referencia actual deformando su geometría inicial, forzando las coordenadas de los elementos representados a posiciones desconocidas en la época de redacción de los mapas, fijadas mucho tiempo después con tecnologías más avanzadas. Sea cual sea el procedimiento utilizado en la georreferenciación de los mapas antiguos que carezcan de sistemas de referencia matemáticos, quedará comprometido el estudio de su posicionamiento original.

En un primer momento, centraremos nuestro trabajo en el manejo de cartografía española de los siglos XVIII y XIX, época en la que se fueron generalizando los procedimientos de la geodesia y la cartografía matemática y que coincide con el momento de eclosión de los catastros. Esto nos permitirá indagar sobre la evolución de las técnicas científicas que condujeron hacia la cartografía actual reconstruyendo los antiguos sistemas de referencia. Por tanto, el objetivo fundamental de la georreferenciación no será la obtención de un mapa absolutamente ajustado como si se hubiera construido en la actualidad. Todo lo contrario, se trata de situar el mapa tal y como se generó, para poner de relieve el conocimiento, las técnicas y los datos de su época.

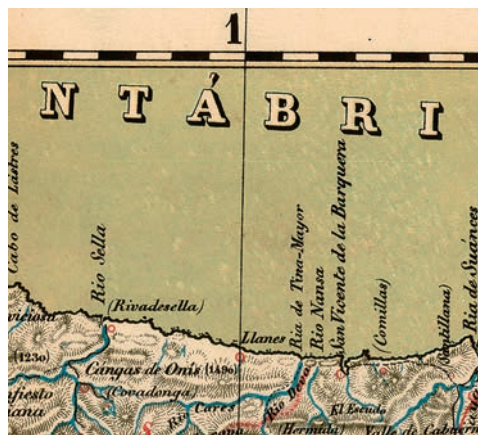
Por ejemplo, observemos la posición de un punto con respecto a un mismo meridiano en una serie de mapas antiguos. Fijaremos la atención en la villa de Llanes y en el meridiano de 1° al oeste del observatorio de Madrid. En primer lugar, veamos un mapa de Pedro Martín López de 1852 a escala aproximada 1:1.860.000. En él encontramos Llanes a unos segundos al este del meridiano de 1° (fig. 1).

Figura 1
Mapa de España de Pedro Martín López, 1852



En el siguiente *mapa de España y Portugal* a escala 1:1.000.000 de 1860, obra de Francisco Coello, Llanes aparece exactamente sobre la línea del meridiano de 1° (fig. 2).

Figura 2
Mapa de España y Portugal de Francisco Coello, 1860



En el *Mapa Itinerario Militar del Depósito de la Guerra de 1865* a escala 1:500.000, Llanes salta la línea y se sitúa más de un minuto al oeste del meridiano que estamos tomando como referencia (fig. 3).

En el de Ibáñez de Ibero del año 1884 a escala 1:1.500.000, encontramos la villa de Llanes a unos 4 minutos al oeste del meridiano de 1°. Esta posición es prácticamente equivalente a su longitud fijada en la actualidad a 4°45'10" W de Greenwich (fig. 4).

La evaluación de estas diferencias de posición se hace mucho más difícil a medida que nos alejamos de las líneas de los meridianos, a no ser que visualicemos todos estos mapas con un software cartográfico y que hayamos conservado sus sistemas de referencia originales durante el proceso de su georreferenciación. Obviamente, tales diferencias de posición quedarían completamente enmascaradas o, incluso, eliminadas en una georreferenciación que utilizase la villa de Llanes, o cualquier otro elemento cercano, como punto de control en el ajuste hacia un sistema de coordenadas actual.

Ahora bien, en todo proceso de georreferenciación digital es necesario introducir

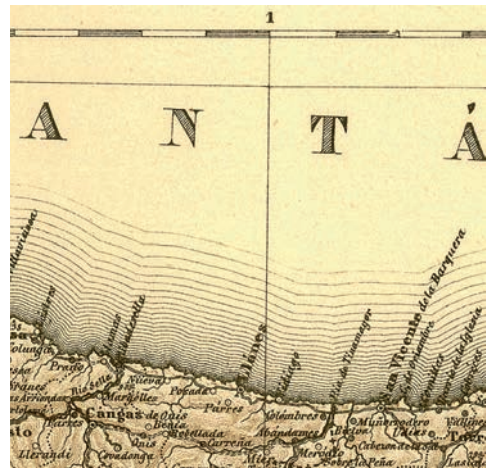
una serie de puntos de control también si vamos a situar el mapa en su sistema de coordenadas original. Siempre hay que explicitar numéricamente cuáles son las coordenadas cartográficas de determinados puntos visibles en el mapa digitalizado. ¿Qué elementos debemos elegir? La respuesta es clara: los mismos que establecían el armazón geográfico del mapa original, su red de meridianos y paralelos. La red de círculos terrestres siempre ha sido una malla teórica, independiente de las técnicas de observación, de la exactitud de los métodos de posicionamiento utilizados para la captura de datos y del trazado de los objetos reales representados en los mapas (Snyder, 1993: 2). Establece un sistema de referencia que ha pervivido durante siglos y que aún sigue y seguirá utilizándose. Ajustando los mapas a la red teórica de meridianos y paralelos tendremos la magnífica oportunidad de contar con un marco de comparación común para todos ellos.

En muchos casos, tendremos que realizar una traslación del origen de coordenadas

Figura 3
Mapa Itinerario Militar del Depósito de la Guerra, 1865



Figura 4
Mapa de España de Ibáñez de Ibero, 1884



nadas geográficas, dando respuesta al problema de la multiplicidad de meridianos de referencia (Almonacid, 2016) hasta la generalización del meridiano de Greenwich como origen de longitudes universal. Pero esta elemental operación matemática, especialmente sencilla en el software cartográfico, no altera en absoluto el modelo de referencia básico de la cartografía, fundamentado en una red de paralelos y meridianos.

Procedimiento de georreferenciación de mapas de los siglos XVIII y XIX

El procedimiento seguido incluye los siguientes pasos:

1. Descripción y análisis de las características generales del mapa y sus ficheros: fuente, formato, resolución, escala, división en hojas y sus características, malla de meridianos y paralelos, unidades, información sobre su proyección y sistema de referencia, contexto histórico y cartográfico, propósito del mapa, posibles medios empleados, estado de conservación, etcétera.

2. Evaluación de las deformaciones del papel y de su proceso de escaneado. Posibles ajustes. Mejora de la visualización del fichero digital.

3. Creación de ficheros digitales vectoriales que reconstruyan numéricamente la malla de meridianos y paralelos del mapa original.

4. Análisis e identificación del sistema de proyección y de referencia originales cuando no sean conocidos o no hayamos conseguido suficiente información sobre ellos en el primer paso de este procedimiento.

5. Georreferenciación de los ficheros de los mapas en el sistema de proyección y de referencia originales, o que hayamos

identificado como más próximo a los originales, utilizando la malla de meridianos y paralelos.

6. Evaluación de las deformaciones puestas en evidencia en el proceso de georreferenciación.

7. Ajuste de las deformaciones de la malla de meridianos y paralelos representada en el mapa a su posición teórica.

8. Transformación de los ficheros georreferenciados a un sistema de referencia actual para facilitar su manejo por las librerías de software cartográfico.

9. Una vez llevada a cabo esta georreferenciación, respetuosa con el documento cartográfico original, pueden plantearse las necesidades de otras aplicaciones en las que se requiera una adecuación mayor de los elementos representados en el mapa a sus posiciones reales. En estos casos, se podrá realizar sobre los ficheros ya georreferenciados un ajuste irregular por triangulación basado en puntos de control identificados sobre las entidades cartografiadas en el mapa.

A continuación, comentaremos las operaciones de todo este procedimiento que pueden requerir de una explicación más detallada.

1. *Descripción y análisis de las características generales del mapa y sus ficheros: fuente, formato, resolución, escala división en hojas, malla de meridianos y paralelos, unidades, información sobre su proyección...* Entre toda la información a recopilar en este punto, ahora destacaremos los datos sobre la proyección y el sistema de referencia del mapa antiguo, incluyendo las características de su malla geográfica de meridianos y paralelos, básica para la reconstrucción del sistema de georreferencia original. A veces, encontramos mapas que poseen marcos graduados, pero carecen de malla geográfica. Podemos plantearnos trazarla sobre la imagen del mapa a partir de su marco graduado cuando meridianos y paralelos sean rectilíneos. Esto llega a suce-

der con frecuencia, bien por la proyección empleada –como la de Mercátor, utilizada habitualmente en las cartas náuticas desde el siglo XVII hasta nuestros días o en las antiguas proyecciones poliédricas– bien por las simplificaciones introducidas por algunos cartógrafos, como Tomás López, que aplana ligeramente las amplias curvas sinusoidales de los meridianos de la proyección sinusoidal en nuestras latitudes para convertirlas en rectas y facilitar su trabajo. En las ocasiones en que seamos capaces de dibujar la malla geográfica sobre el mapa, tendremos la posibilidad de densificarla para llegar a obtener tantos puntos de cruce como necesitemos para el proceso de georreferenciación.

En la cartografía antigua, raramente se expresa cuál es su *sistema de proyección*, pero éste será el momento de anotarlo, en el caso de que aparezca citado. A veces, este dato se puede obtener en las obras relacionadas con la publicación de los mapas, como ocurre en los *Derroteros* de las costas españolas que acompañaban al *Atlas Marítimo* de Tofiño. En otras ocasiones, puede aparecer en los estudios académicos y obras de referencia sobre los mapas o sus autores. Este es uno de los datos más valiosos para nuestro proceso de georreferenciación y no escatimaremos esfuerzos para conseguirlo. Aun así, en muchas ocasiones no llegaremos a conocer fehacientemente cuál fue la proyección cartográfica empleada en la confección del mapa. También, es muy habitual que, siendo conocido el sistema de proyección, nos falte alguno de sus datos clave, como los paralelos estándar empleados en las proyecciones cónicas. En un punto posterior del proceso, describiremos el método que hemos utilizado para llegar deducir, con un grado de aproximación suficiente, el sistema de proyección de los mapas históricos cuando carecíamos de esta información.

Tampoco es habitual que los autores de los mapas antiguos informen sobre la *figura*

de la tierra que utilizaban, si era una esfera o uno de los elipsoides que iban siendo propuestos y formulados por diferentes cartógrafos. En cualquier caso, este dato es de menor relevancia y modifica muy poco la geometría del mapa cuando se trata de cartografía regional a escalas pequeñas o medias. Las diferencias métricas debidas a los cambios de *datum* suelen estar por debajo de la precisión esperada en el trabajo con este tipo de mapas antiguos. Siempre se puede acudir a la bibliografía especializada para obtener alguna hipótesis válida sobre la figura de la tierra utilizada, cuya aplicación cotejaremos siguiendo el método que, como decimos, será descrito más adelante.

Otro dato fundamental para nuestro proceso de georreferenciación es el del *origen de la malla de coordenadas geográficas*. Tradicionalmente, el origen de latitudes se ha situado en el Ecuador como círculo máximo entre todos los paralelos, pero la longitud se podía contar desde cualquier meridiano origen, pues todos son segmentos de círculos máximos que unen ambos polos. En España, según avanzaba el siglo XIX, se fue generalizando el uso del meridiano del Observatorio Astronómico de Madrid, pero en el siglo XVIII y durante buena parte del XIX, podemos encontrar mapas referidos a los meridianos de El Hierro, del pico del Teide, de París, del seminario de nobles de Madrid y –en la cartografía hidrográfica– de Cádiz, Ferrol, Cartagena o de San Fernando, entre otros.

Es necesario saber cuál es la posición del meridiano origen del mapa con respecto al meridiano de Greenwich, que pasó a ser el meridiano universal a partir del siglo XX y es el estándar que se maneja en todo el software cartográfico. Algunos de estos viejos meridianos fueron muy utilizados hasta bien avanzado el siglo XX, especialmente los vinculados a la cartografía francesa, reacia a la adopción de un meridiano inglés. También la tradición española se mantuvo

fiel al meridiano de Madrid, al de Cádiz o al de San Fernando, si bien nuestras cartas náuticas adoptaron el de Greenwich bastante antes que nuestros mapas terrestres. Gracias a esta tenacidad localista, algunos de estos meridianos tuvieron que ser tenidos en cuenta en la programación del software cartográfico y, así, en muchos programas, encontramos incluidos los meridianos de París, El Hierro –o *Ferro*, muy presente en la tradición francesa– y el del Observatorio de Madrid, con sus posiciones bien fijadas respecto al de Greenwich. En el caso de otros meridianos, cuyo uso decayó en fechas más tempranas –el Teide, Cádiz o Ferrrol–, hemos acudido a la bibliografía, a las obras históricas en las que se recogían las observaciones de los propios cartógrafos, o a los datos recogidos en los mapas antiguos de mayor fiabilidad. Con todo ello, hemos podido calcular la posición de los antiguos meridianos respecto a Greenwich con suficiente precisión (Almonacid, 2016).

2. *Evaluación y posible corrección de las deformaciones y deterioros del papel. Mejora de la visualización del fichero digital:* La antigüedad de los documentos cartográficos históricos es fuente de alteraciones y de deformaciones. Los deterioros más frecuentes son fruto del plegado de las hojas durante decenios, de su entelado tras ser cortadas en cuarterones, o de su encuadernación en viejos volúmenes. La humedad o la presencia de dobleces también pueden haber deformado la geometría inicial de los mapas. Es raro encontrar ejemplares carentes de alguna de estas alteraciones, que pueden llegar, en los peores casos, a la pérdida de fragmentos de papel.

Por otro lado, el proceso de escaneado de los mapas también puede introducir deformaciones geométricas, frecuentemente micro-arrugas y pequeños pliegues.

Por último, las condiciones de almacenamiento, contando con la presencia de humedades o parásitos y el mero paso del tiempo, suelen haber modificado el color

del papel y deteriorado la calidad de la tinta impresa.

Hemos acudido a la informática gráfica para corregir algunas de estas alteraciones. Se han utilizado herramientas de transformación geométrica y de retoque de color que pueden encontrarse en el software usual de tratamiento de imágenes. Los ajustes geométricos se han limitado a las herramientas más sencillas, menos agresivas, incluyendo los giros, los pequeños cambios de tamaño parciales y ligeros sesgados o distorsiones muy localizadas. No hemos utilizado las herramientas generales de ‘*rubbersheet*’, o ajuste por triangulación, muy poco precisas en los programas no geográficos de tratamiento de imágenes. Las hojas cartográficas sueltas raramente necesitan ajustes geométricos, que en buena medida deben ser aplicados para estirar dobleces de encuadernación y para eliminar entelados.

En lo que se refiere a los ajustes de color, se ha procurado recuperar el tono neutro del papel de fondo con herramientas de corrección selectiva y de limpieza de manchas. Se han vivificado y reforzado las partes impresas y, en su caso los colores, mediante ajustes sobre los histogramas de los canales de color, ajustes de saturación y filtros de enfoque.

En definitiva, se trata de acercar los ficheros digitales a los originales primitivos antes de comenzar cualquier procedimiento de georreferenciación.

3. *Creación de ficheros digitales vectoriales que reconstruyan numéricamente la malla de meridianos y paralelos del mapa original:* Este procedimiento de georreferenciación se fundamenta en hacer explícito digitalmente el sistema de coordenadas original de cada mapa. Para ello, es necesaria la introducción de puntos de control –o puntos homólogos– que identifiquen la posición de los meridianos y paralelos dibujados sobre el mapa con los de una malla teórica, generada mediante procedi-

mientos matemáticos a partir de coordenadas numéricas en el mismo sistema de referencia original del mapa o, al menos, uno equivalente.

En primer lugar, acudiremos a la documentación recopilada en el primer punto de este procedimiento para conocer la longitud geográfica del meridiano origen de las coordenadas del mapa con respecto al de Greenwich. Recordemos que el software cartográfico utiliza el meridiano de Greenwich de forma estándar en todas sus operaciones y conviene que todas las mallas de meridianos estén referidas a él. También es conveniente anotar las siguientes características de la malla de meridianos y paralelos que aparece representada en el mapa:

- latitud de los paralelos situados en los extremos norte y sur de la malla,
- longitud respecto a Greenwich de los meridianos que delimitan sus laterales,
- paso de malla o intervalos de latitud y de longitud representados en la red de meridianos y paralelos del mapa,
- número de celdas de la malla en dirección norte-sur y en dirección este-oeste.

A partir de estos datos, y utilizando el software cartográfico del que dispongamos, construiremos numéricamente una malla ortogonal de meridianos y paralelos, empleando coordenadas geográficas en grados decimales referidas al meridiano de Greenwich. Este fichero vectorial poseerá una estructura de datos propia del software cartográfico, incluyendo su georreferenciación directa e inmediata en un sistema de coordenadas geográficas que permitirá su transformación a cualquier sistema de proyección.

Será necesario que el fichero generado cumpla con algunos requerimientos que permitirán que la red de meridianos

y paralelos adopte los trazados curvilíneos propios de muchos sistemas de proyección:

- Los segmentos de meridianos y paralelos limitados por los cruces de la malla serán líneas independientes conectadas en los puntos de cruce.
- Los segmentos entre los cruces deben estar definidos por múltiples vértices, no solo por las coordenadas de sus puntos inicial y final.
- Aunque no estrictamente necesario, es muy conveniente que los cruces de la malla estén marcados por entidades puntuales que puedan ser fácilmente etiquetadas con las mismas cifras de las coordenadas que aparecen escritas en el mapa. Esto facilitará mucho el trabajo posterior de identificación de puntos de control.

Transformaremos la malla vectorial así generada al sistema de referencia del mapa original con las herramientas de proyección del software que vengamos utilizando. La geometría de la malla una vez transformada deberá ser prácticamente igual a la representada en el mapa antiguo. Puede comprobarse visualmente mediante una sencilla operación de superposición gráfica con cualquier software de manejo de imágenes tal y como se describe para el punto siguiente.

4. *Identificación del sistema de proyección y de referencia originales cuando no sean conocidos o no hayamos conseguido suficiente información sobre ellos:* A veces, no será posible obtener información sobre el sistema de referencia del mapa original. No era habitual que los cartógrafos de los siglos anteriores al XX incluyeran este tipo de datos en sus mapas, al menos de forma completa. Puede que lleguemos a conocer la proyección empleada, pero rara vez se nos informará de los parámetros de esa proyección y prácticamente nunca de la figura de la tierra utilizada.

Como ya se ha anotado, las variaciones debidas al empleo de diferentes elipsoides o de distintos *datum* son irrelevantes cuando tratamos con mapas de escala regional y con un nivel de precisión aún muy bajo en la captura de sus datos. No obstante, conviene manejar figuras cuyo uso sea habitual para la época y el contexto cultural del autor.

Otros parámetros más significativos pueden ser fácilmente deducibles con la mera observación del mapa, por ejemplo, el meridiano central de las proyecciones cónicas o cilíndricas (o pseudocónicas y pseudocilíndricas). Pero cuando desconocemos el propio sistema de proyección empleado o alguno de sus parámetros menos evidentes, tendremos que acudir a métodos de indagación que nos permitan identificarlos o llegar a aproximarnos a ellos suficientemente.

Si no tenemos ninguna información sobre la proyección empleada, analizaremos la configuración de la malla de meridianos y paralelos del mapa siguiendo las indicaciones descritas en alguna “Tabla para identificación de las proyecciones” como la incluida en el anexo D de la obra de Joaquim Alves Gaspar *Cartas e Projecções Cartográficas*¹. Estas tablas permiten deducir con bastante aproximación el tipo de proyección a partir de la forma y la estructura de los meridianos y paralelos del mapa— si son rectilíneos, curvilíneos, circulares, el tipo de ángulo que forman, si son perpendiculares entre sí, la distancia que los separa, y otros parámetros geométricos. También suele ser útil consultar algún buen catálogo gráfico de proyecciones cartográficas como el del U.S. Geological Survey (Snyder y Voxland, 1989). La búsqueda puede afinarse acudiendo a la bibliografía sobre la historia de las proyecciones, entre la que resulta especialmente útil la obra ya citada de John P. Snyder (1993).

En algunos casos, llegaremos a deducir con seguridad cuál es la proyección del

mapa original, pero en muchas ocasiones conseguiremos reducir nuestra búsqueda a unas pocas proyecciones o a un determinado tipo de ellas. Para llegar a alguna conclusión válida para nuestro trabajo pondremos a prueba los posibles resultados de la indagación utilizando el siguiente procedimiento: proyectaremos la malla de meridianos y paralelos que habíamos generado numéricamente a alguno de los probables sistemas de proyección que hemos deducido; exportaremos el resultado gráfico a algún formato de imagen estándar y lo superpondremos gráficamente, de forma manual, sobre el fichero escaneado del mapa original para comparar visualmente su ajuste con la malla de meridianos y paralelos representada en él. Elegiremos la opción más aproximada. Del mismo modo, iremos afinando los parámetros de la proyección mediante ensayos sucesivos. Es necesario que este procedimiento de proyección, superposición y comparación de imágenes sea rápido y ágil porque, en ocasiones, habrá que realizar varios ensayos hasta que lleguemos a seleccionar la proyección y los parámetros que más se aproximen a los del mapa original. Cualquiera de los programas actuales de software SIG, combinado con los programas más usuales de tratamiento digital de imágenes permiten un manejo sencillo de este flujo de gráficos.

5 y 6. *Georreferenciación del fichero del mapa antiguo en el sistema de proyección y de referencia originales, o que hayamos identificado como más próximos a los originales, utilizando la malla de meridianos y paralelos. Evaluación de las deformaciones puestas en evidencia en el proceso de georreferenciación:* Hasta que la georreferenciación no se produzca, el fichero digital del mapa antiguo solo tendrá un sistema de coordenadas gráficas basadas en su estructura de píxeles. Una vez se culmine el proceso, el fichero del mapa irá acompañado de los datos numéricos necesarios para que los programas y librerías cartográficas reconozcan

sus coordenadas cartográficas y su sistema de referencia, incluyendo su proyección y un *datum*. En este proceso, se utilizan las herramientas de georreferenciación estándar del software cartográfico, basadas en la identificación expresa de puntos homólogos, también llamados puntos de control. Describiremos los procedimientos más usuales que se suelen llevar a cabo con este tipo de herramientas:

- En el programa de georreferenciación, se introducen el fichero de imagen del mapa antiguo que vamos a georreferenciar y el fichero vectorial de la malla generada numéricamente, que nos servirá de referencia en el proceso.

- Se proyecta el fichero vectorial de la malla en el sistema de referencia que hemos identificado como propio del mapa original. A partir de este momento, la malla numérica estará situada en el sistema de coordenadas definido según la proyección del mapa original.

- A continuación, se localiza y se marca la posición de un primer punto sobre uno de los cruces de la malla de meridianos y paralelos representada en el fichero del mapa a georreferenciar. De este modo, se obtiene un par de coordenadas gráficas, relativas, en el sistema de filas y columnas de los píxeles del fichero del mapa.

- Seguidamente, se localizará y se marcará la posición del mismo cruce de meridiano y paralelo sobre el fichero vectorial de la malla que se ha generado numéricamente y se ha proyectado en el sistema de referencia del mapa original. De este modo, se obtiene el par de coordenadas homólogo al del primer punto marcado sobre el fichero del mapa, pero en este caso, en el sistema de coordenadas cartográficas numéricas definido durante el proceso de proyección de la malla vectorial.

- Se opera del mismo modo para obtener una cantidad significativa de puntos homólogos bien distribuidos por toda la superfi-

cie del mapa. Son necesarios de seis a diez puntos para poder aplicar distintos métodos de ajuste de coordenadas. De todos modos, más importante que su número es su distribución por todo el ámbito del mapa. Cualquier software de georreferenciación permite ir evaluando el ajuste de las posiciones de los distintos puntos del mapa en su transformación hacia el sistema de coordenadas cartográficas, a medida que se van introduciendo los pares de puntos homólogos.

La geometría de la malla del mapa y la del fichero vectorial de meridianos y paralelos debe ser muy similar porque ambas han sido generadas –aunque con muchos años de diferencia– según el mismo sistema de proyección y de referencia o, al menos, con sistemas muy semejantes. De todos modos, siempre existirán diferencias entre ellas, incluso si hubiéramos llegado a identificar exactamente el sistema de proyección original con todos sus parámetros, hay que seguir contando con las deformaciones del papel y con los errores de dibujo de la malla de meridianos y paralelos en mapas construidos, delineados y grabados hace muchos decenios.

Utilizaremos métodos de transformación de coordenadas que permitan evaluar esas diferencias. Las funciones lineales y cuadráticas de transformación son las más adecuadas. Con ellas obtendremos valores para el error medio cuadrático de todos los puntos introducidos, así como para los errores residuales de cada uno de ellos. Mediante estos valores analizaremos, ahora de forma cuantificable, el grado de adecuación del mapa original al sistema de referencia que hemos asumido como válido –haya sido obtenido por deducción, o porque lo hubiera expresado el autor del mapa– también las probables deformaciones del documento original –arrugas, dobleces, dilataciones, grietas u otras.

Por encima de un determinado error, la georreferenciación no sería válida. Para fijar

este margen de error, hemos utilizado la fórmula que estima el error lineal medio de los documentos cartográficos en un cuarto de milímetro:

$$0,00025 \times M = le$$

Dónde $M =$ denominador de la escala;

$le =$ error lineal en metros

Este error se ha situado, quizá con excesivo rigor, en 0,2 mm por parte de un grupo de trabajo dedicado al análisis de los mapas de Tomás López (Manzano Agugliaro et ali., 2012; Martínez et ali., 2012). En nuestro caso, hemos acudido a obras de carácter general sobre SIG y cartografía para encontrar más argumentos sobre la precisión de los documentos cartográficos. Fisher (1991), siguiendo los estándares del *US Bureau of the Budget*, estima que cualquier punto situado sobre un mapa analógico de gran escala (hasta 1:20.000), no debe tener un error posicional mayor de 1/50 pulgadas (0,508 mm). Error que eleva hasta 1/30 pulgadas (0,8466 mm) en los mapas de escalas más pequeñas. En cuanto a los puntos de mayor precisión, siguiendo a Merchant (Merchant, 1987), establece que el error medio cuadrático de la desviación de los puntos de control debe limitarse a un máximo de 0,25 mm para mapas hasta la escala 1:20.000; lo que para mapas de menor escala podríamos llevar hasta 0,42 mm manteniendo la relación anterior. En el mismo artículo, Fisher, aporta una regla aplicable a todos los mapas impresos: “es imposible representar con precisión cualquier objeto que tenga unas dimensiones inferiores al ancho de una línea dibujada” (Fisher, 1991: 179). Siguiendo a Tobler (1988), Fisher, estima que la resolución de un mapa impreso, es decir, el tamaño mínimo de un objeto puntual que sea discernible en el dibujo del mapa es de 0,5 mm. Teniendo todo esto en cuenta, aunque inicialmente limitemos el error esperado para nuestros puntos de control a 0,25 mm, podemos disponer de

un margen bastante más amplio para estos trabajos.

Téngase en cuenta que la reflexión de Fisher se refiere a la lectura y a la construcción de mapas nuevos, actuales. En nuestro caso, la precisión previsible estaría en el entorno de esas cifras si solo dependiera de los errores atribuibles al trazado –dibujo, grabado e impresión– de la malla de meridianos y paralelos del mapa. A esos errores habrá que añadir los derivados de las operaciones de cálculo de esa malla con antiguas técnicas de cómputo y los debidos al estado de conservación de los documentos cartográficos históricos. Destacaremos la significativa incidencia del plegado y, sobre todo, del entelado de los mapas antiguos en el incremento del margen de error. De este modo, el umbral de error admisible fijado inicialmente se podría llegar a duplicar o, incluso, a triplicar en el caso de los mapas entelados o deficientemente conservados.

En definitiva, cuando se hayan introducido los puntos de control necesarios y se haya comprobado que los errores en su transformación se mantienen dentro de límites razonables, se aplicará esa transformación a todo el fichero del mapa antiguo. El resultado será un fichero de imagen ya georreferenciado de forma expresa en el mismo sistema de referencia que poseía el mapa original. Los cambios en la geometría de los píxeles del fichero han de ser pequeños, puesto que solo hemos reconstruido digitalmente su georreferenciación original: *lo más importante de este proceso es que, a partir de ahora, el mapa antiguo poseerá todas las características de una capa cartográfica digital, incluido un sistema de coordenadas y de referencia manejable por el software de cartografía digital.*

7. *Ajuste de las deformaciones de la malla de meridianos y paralelos:* aún se han introducido algunos ajustes posteriores para afinar los resultados del proceso. En este punto realizamos un ajuste por triangulación –a veces llamado ajuste elástico, trans-

formación *spline* o *rubbersheet*– utilizando todos los cruces visibles en la malla de meridianos y paralelos. De este modo, una vez que estamos seguros de haber reconstruido el sistema de referencia original del mapa dentro de unos márgenes de error asumibles, obligamos a que los meridianos y los paralelos trazados en los mapas coincidan exactamente con los meridianos y paralelos definidos teóricamente. Así, todos ellos estarán ajustados a una referencia común que permitirá su correcta comparación.

8. Finalmente, todos los mapas se transforman a un sistema de referencia actual para facilitar su manejo en la web y para simplificar el trabajo de las herramientas de visualización. En cualquier caso, una vez que los ficheros originales ya han sido georreferenciados, los cambios de proyección se realizan con las herramientas más precisas del software cartográfico, manteniendo siempre la coherencia en los procesos de transformación de coordenadas y el control de las deformaciones.

9. *Ajuste irregular por triangulación basado en puntos de control identificados sobre las entidades cartografiadas en el mapa:* Una vez finalizado el proceso hasta aquí, frecuentemente encontramos que el ajuste de la malla geográfica de meridianos y paralelos del mapa es impecable, pero el posicionamiento de los elementos cartografiados difiere mucho de su localización real. Más allá de nuestro interés principal por el análisis cartográfico y la explicación de estas diferencias de posicionamiento, hay determinadas aplicaciones de vocación histórica en las que la cartografía antigua es utilizada como referencia o fuente de información y que necesitan de una georreferenciación que sitúe las entidades representadas en posiciones más próximas a su auténtica ubicación, sin darle tanta importancia a la deformación que sea necesario aplicar al mapa para conseguirlo. En la cartografía de gabinete –construida mediante la simple recopilación de informaciones muy dispares

e imprecisas, sin levantamientos geométricos sobre el terreno– podemos encontrar desplazamientos de kilómetros o decenas de kilómetros en direcciones muy dispares, incluso divergentes para los distintos puntos del mapa.

En los casos en los que se estime necesario un ajuste del contenido del mapa, se introducirán nuevos puntos de control bien repartidos sobre la superficie de la imagen ya georreferenciada, utilizando elementos fijos representados en el mapa antiguo cuya pervivencia en la cartografía actual tenga un posicionamiento fuera de duda. Quedarán excluidos los ríos que discurren en valles de fondo plano y las costas bajas, los límites de masas de vegetación y de los usos del suelo serán puestos en duda, en los elementos de construcción humana, como las vías de comunicación o las construcciones deberá ser analizada su evolución y perdurabilidad. Los nuevos puntos de control serán el soporte de un ajuste irregular por triangulación (*rubbersheet*) como el que ya habíamos utilizado en el acoplamiento final de los mapas a la malla geográfica de meridianos y paralelos. Es posible la creación de una red de triángulos a partir de la introducción de 9 ó 10 puntos homólogos que actúan como vértices inmóviles. Los vectores de deformación gradúan el desplazamiento de la imagen a través de las líneas de esa red según la distancia a los vértices fijos a los que el mapa quedará completamente acoplado. En la cartografía más imprecisa puede resultar imposible un ajuste completo. Puntos próximos pueden tener vectores de desplazamiento incompatibles y llegar a producir cizalladuras inadmisibles en la imagen resultante. Este tipo de ajuste puede resultar aberrante para la forma del mapa original y es frecuente que sea necesario añadir puntos de control auxiliares a lo largo de los márgenes de la hoja para mantenerla dentro de una apariencia razonable.

El visor del Atlas Geográfico de España de Tomás López en la web del Servicio de

Cartografía de la Universidad Autónoma de Madrid muestra algunos de los mapas provinciales de esa obra, que ejemplifica la imprecisa cartografía de gabinete. En una primera versión de cada mapa, estos se presentan tras haber sido georreferenciados en su sistema de referencia original –proyección sinusoidal con origen de coordenadas en el meridiano del Pico de Tenerife y meridiano central adaptado a cada provincia– que debe ser inmediatamente corregido mediante una traslación a la posición del que hemos denominado punto principal de cada mapa, el que mayor peso pudo tener en su construcción y que suele coincidir con la capital de la provincia. La segunda versión de los mapas que se presenta ha sido deformada para ser adaptada a la posición de una serie de poblaciones significativas mediante un ajuste irregular por triangulación (fig. 5).

De su misma época, pero en el extremo opuesto, encontramos las cartas del *Atlas Marítimo de España* de Vicente Tofiño (1789) como ejemplo de cartografía científica realizada a partir de levantamientos geométricos en los que se utilizaron las más modernas técnicas e instrumentos del momento. Se pueden visualizar algunas de ellas en el visor sobre Historia de la Cartografía de España del mismo sitio web. Han podido ser georreferenciadas sin dificultad en su sistema de referencia original –proyección de Mercátor con origen de coordenadas en el meridiano de Cádiz– para ser superpuestas sobre la cartografía actual (fig. 6).

Obviamente, el encaje de las cartas de Tofiño con los mapas del presente no es impecable, pero sus discrepancias son mucho menores, más sistemáticas y más localizadas que en el *Atlas de Tomás López* y no es necesaria una traslación ni ningún otro

Figura 5
Visor Historia de la Cartografía UAM (Mapa de Tomás López)

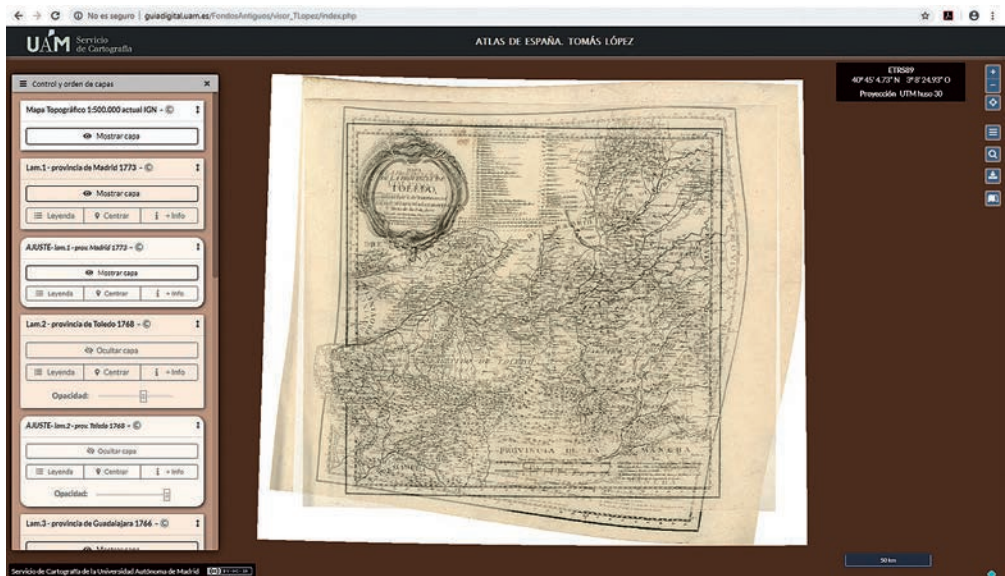
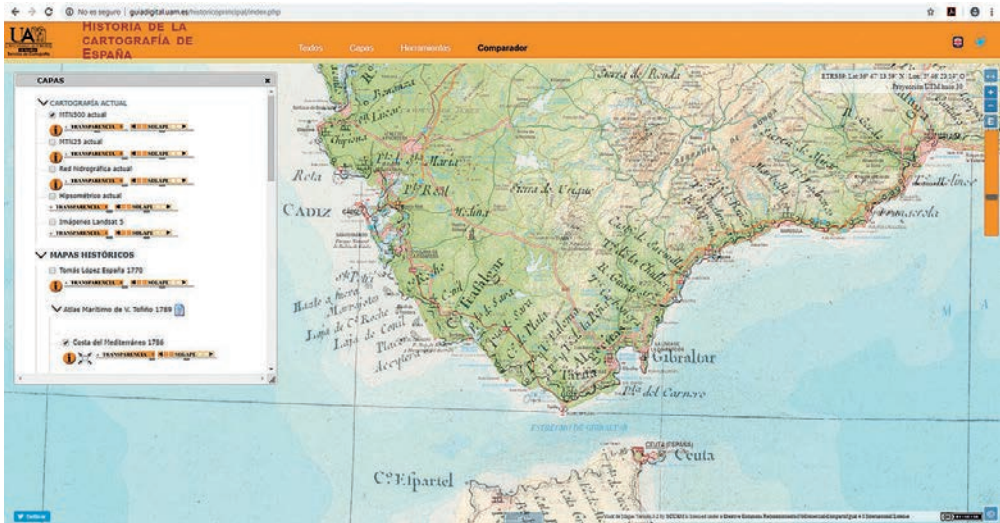


Figura 6

Visor Historia de la Cartografía UAM (Carta del Atlas Marítimo de España de Vicente Toño)



ajuste para obtener una visualización que permita comenzar a analizarlas. En cualquier caso, si alguna aplicación o posible utilización de estas cartas necesitara de un ajuste más minucioso y puntual, se les aplicaría el ajuste por triangulación descrito más arriba. Las deformaciones aplicadas en este caso serán de menor cuantía y no llegarán a distorsionar la forma general del documento.

A modo de breve conclusión

En definitiva, este procedimiento de georreferenciación de cartografía antigua es un proceso gradual, que va generando ficheros sucesivos. Los primeros mantienen la geometría y el sistema de referencia del documento original para permitir su análisis cartográfico y posicional. En las versiones siguientes, se utilizan ajustes y

deformaciones más intensas con las que adaptarse a las posiciones recogidas en la cartografía actual cuando otro tipo de aplicaciones así lo exigen.

Bibliografía

- ALMONACID, C. (2016): *Longitudes de los Antiguos Meridianos en la Cartografía Española*. Consultado en <http://guiadigital.uam.es>. Recoge las referencias y los cálculos en los que nos hemos basado para obtener los datos de estos viejos meridianos.
- ALVES GASPAS, J. (2000): *Cartas e Projecções Cartográficas*. Lisboa, LIDEL, Coleção Geomática.
- CRESPO, A. (2013): "Herramientas y Metodología para el análisis de mapas antiguos", en *Tiempos Modernos*, 26, 29 pp.
- FISHER, P.F. (1991): "Spatial data sources and data problems", en MAGUIRE, D. J., MAGUIRE, D.J., MAGUIRE, D.J., GOODCHILD y RHIND, D.W. (eds): *Geographical information systems principles*

- and applications*. England, Longman Scientific and Technical, 2 tomos, pp. 175-189.
- MANZANO-AGUGLIARO, F., MARTÍNEZ, J. y SAN ANTONIO, C. (2012): "Gis analysis of the accuracy of Tomas Lopez's historical cartography in the Canary Islands (1742-1746)", en *Scientific Research and Essays Vol. 7(1)*, pp. 199-216.
- MARTÍNEZ, J., MANZANO-AGUGLIARO, F. y SAN ANTONIO, C. (2012): "El Atlas Geográfico de España de Tomás López: Análisis mediante SIG de las poblaciones del "Reyno de Jaén" (1787)", en *CT Catastro*, 74, pp. 111-138.
- MERCHANT, D.C. (1987): "Spatial accuracy specification for large scale topographic maps", en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (7), pp. 958-61.
- SNYDER, J.P. y VOXLAND, P.M. (1989): *An Album of Map Projections*. U.S. Geological Survey professional paper 1453. Denver, U.S. Government Printing Office.
- SNYDER, John P. (1993): *Flattening the Earth. Two Thousand Years of Map Projections*. Chicago & London, The University of Chicago Press.
- TOBLER, W.R. (1988): "Resolution, resampling and all that", en MPOMSEY, H.M. (Ed.): *Building Databases for Global Science*. Taylor & Francis, London, pp. 129-137.