

CARTOGRAFÍA Y MAPAS

Definiciones y problemas fundamentales

UN mapa aparece como un conjunto de dibujos, signos y palabras escritas, de muy variado aspecto, a veces muy sencillo, como un croquis dibujado en un papel o una pizarra, otras muy complejo, impreso en numerosos colores; pero de cualquier modo, un mapa es siempre un esquema de la realidad, y su formación obedece a numerosos acuerdos y convenciones, expresos o implícitos, que deben conocerse para la interpretación correcta de estas representaciones del terreno.

Hay además mapas especiales, que no pretenden describir la superficie terrestre, sino indicar el lugar donde ocurren determinados fenómenos, humanos o no (producciones agrícolas, meteorología, enseñanza primaria), pues todo hecho localizable en el espacio puede representarse en un mapa. A este tipo de mapas se les llama *temáticos*, en oposición a los *topográficos*, que sólo describen los accidentes naturales o artificiales del terreno.

Pero también existen mapas que no se refieren a la superficie de la Tierra, sino a la de la Luna, o cualquier otro astro, o a una parte de la esfera celeste. Por esta razón, es necesario considerar con mucha amplitud el concepto de mapa, que ha sido definido por la Asociación Cartográfica In-

GERARDO VÁZQUEZ PASCUAL

SECRETARIO TÉCNICO
DEL CONSEJO SUPERIOR
GEOGRÁFICO

*A la memoria
del Ingeniero Geógrafo Francisco
Vázquez Maure,
el más insigne cartógrafo de los
últimos cincuenta años.*



ternacional como "la representación convencional gráfica de fenómenos concretos o abstractos, localizados en la Tierra o en cualquier parte del Universo".

Las palabras *mapa* y *plano* no son sinónimas, pero existe, en general, confusión en su empleo, que debe aclararse. Los planos son una clase de mapas en los que al no considerar la esfericidad de la Tierra, o sea, el suponerla plana, no causa error apreciable. Ahora bien, este convenio sólo puede hacerse en extensiones reducidas del terreno, que por serlo se representan en tamaño bastante grande (a escala grande, como después veremos); esta es la causa del generalizado y erróneo concepto de que los planos son sólo mapas de escala grande.

La identificación correcta de plano es, "mapa en el que se representa una superficie suficientemente limitada para que se haya prescindido de la curvatura de la Tierra en su formación y en el que se considera la escala como uniforme".

El estudio de todas las cuestiones referentes a los mapas forma parte de una ciencia más general, que es la cartografía, definida como "el conjunto de estudios y operaciones científicas y técnicas que intervienen en la formación o análisis de mapas, modelos en relieve o globos, que representan la Tierra, parte de ella o cualquier parte del Universo".

Los problemas esenciales y eviden-

tes que afectan a la representación de la superficie terrestre son dos, y en ellos hay que insistir mucho desde el primer momento, porque de su desconocimiento surgen errores muy graves. Aún antes de citar estos problemas, hay que adelantar que no existe solución total para ellos: todo mapa es una aproximación, nada más.

El primer problema está causado por las dimensiones de la superficie terrestre, que son mucho mayores que las que pueden emplearse para su representación. El segundo consiste en que la superficie de representación generalmente es plana, mientras que la superficie terrestre no lo es. El primer problema conduce al concepto de escala; el segundo se desdobra en dos series de soluciones aproximadas:

los métodos de representación del relieve y los métodos de proyección cartográfica.

En general, la escala se define como cociente entre una distancia entre dos puntos en el mapa y la correspondiente en el terreno. Si la superficie es limitada en extensión y se puede considerar la Tierra como un plano, esta última distancia es la que existe entre las proyecciones ortogonales sobre dicho plano; entonces no existe problema. Pero si se considera la Tierra como esfera o como elipsoide, esta distancia ya no es recta y se presenta el problema de que el cociente no puede ser el mismo para cualquier par de puntos: la escala es sólo aproximada.

De forma más general, la Tierra esférica (o elipsoidal) se representa en un plano por alguno de los cente-

nares de métodos que se han inventado y que se llaman *proyecciones geométricas*. Ninguna de ellas es capaz de conservar la escala uniforme (las proyecciones *automecóicas* conservan la escala en ciertas direcciones determinadas), y además, mientras unas conservan las formas (los ángulos) y se llaman *conformes*, otras no modifican las superficies (proyecciones equiva-



Un mapa es la representación convencional gráfica de fenómenos concretos o abstractos, localizados en la Tierra o en cualquier parte del Universo. (La Tierra desde la Luna.)

lentes), pero ninguna goza de las dos propiedades.

El problema de la representación del relieve, a su vez, ha encontrado muchas soluciones, más o menos acertadas, pero su fundamento es, casi siempre, el empleo de curvas de nivel.

Decisiones previas

El planeamiento de la formación de un mapa topográfico empieza por la elección de la escala, que generalmente está condicionada por el uso a que el mapa se destina y por los medios disponibles.

En la preparación del proyecto general del mapa se decide, además, la proyección cartográfica, el método de representación del relieve, los colores en que se imprimirá, etc.

Las dimensiones de las hojas del mapa dependen de las posibilidades técnicas de impresión y de las condiciones previstas para el empleo del mapa, su almacenaje y conservación. Según las dimensiones posibles, se establece el sistema de división del mapa total en hojas, y hecho esto se decide el sistema de numeración de las mismas.

Es fundamental establecer previamente cuál va a ser el contenido del mapa y qué método va a emplearse en cada una de sus fases, con presupuesto completo de material, personal y gastos.

Operaciones fundamentales: geodesia y nivelación

En la realización de un mapa se pueden distinguir las siguientes etapas: trabajos de campo, cálculo y forma-

ción de minuta, realización de originales y trabajos de reproducción.

La época científica de la cartografía comenzó cuando los mapas fueron resultado de trabajo de medida en el terreno que les proporcionaron la necesaria fidelidad. Estos trabajos de campo se han reducido mucho en los últimos tiempos, pero en cambio su precisión es cada vez mayor.

Son fundamentales las operaciones geodésicas, con las que se logra determinar la posición de una serie de puntos, que deben situarse con la mayor precisión posible, porque van a servir de base para todos los trabajos posteriores. Estos puntos primordiales, generalmente relacionados entre sí, forman una red que cubre la zona representada; cuando se conoce la figura de esta malla resulta posible dibujar otra semejante y de menor ta-

maño, es decir, reducida a escala.

Averiguar la situación de estos puntos respecto a otros equivale a conocer las distancias que los separan y las figuras geométricas que se forman al unirlos entre sí; esto se consigue uniéndolos idealmente de manera que formen una red de triángulos. Los triángulos quedan determinados por la medida de sus lados y de sus ángulos. Naturalmente, para que estas operaciones sean posibles, cada vértice debe ser visible desde varios otros, y ésta es la única condición necesaria para la elección de estos puntos.

Por ser los apoyos fundamentales del mapa, los vértices de los triángulos tienen una gran importancia y se marcan sobre el terreno construyendo unas señales especiales, que en España son hitos de grandes dimensiones, pintados de blanco para hacerlos visibles desde mucha distancia. También se utilizan como vértices puntos elevados ya existentes, generalmente torres de edificios destacados (iglesias, castillos, etc.).

Para algunos de ellos, se calcula por diferentes métodos de longitud y latitud, y mediante cálculos posteriores se averiguan análogas coordenadas para todos los demás. Así se consigue situarlos en una red de meridianos y paralelos. En cualquiera de los dos casos, con la observación y cálculo de la triangulación de una zona se consigue una determinación precisa de la posición planimétrica de los vértices. Se forma así una red primaria de grandes triángulos, que si se trata de una zona muy extensa, como en el caso de un país, será una triangulación geodésica de primer orden. Dentro de esta red, y apoyada en ella, se determina, observa y calcula otra menor (segundo orden), y aún otras menores (geodésica de tercer orden, triangulaciones de cuarto orden o topográficas).

La determinación de la tercera coordenada, que localizará a cada punto en el espacio sin ambigüedad, requiere una operación más: la nivelación. Hace falta en primer lugar determinar la superficie de referencia, que suele corresponder al nivel medio del mar o de un lago en un determinado punto, y a la que se asignará la

Muchos datos necesarios del mapa no son de tipo físico, ya que para conocerlos no bastan los trabajos de campo ni las fotografías. (Mapa del Instituto Geográfico Nacional.)

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL
1 : 50.000

BUITRAGO DEL I



cota cero. Esto se consigue mediante una serie de medidas con un mareógrafo. Después, y por mediciones sucesivas de desniveles o diferencias de altitud (con aparatos de nivelación muy precisos) a lo largo de itinerarios establecidos convenientemente, se averigua la cota de una serie de puntos conocidos, y a partir de éstas se deducen las de los otros. Regresando a estos puntos de partida por diferentes caminos se cierran una serie de anillos a lo largo de los cuales se han marcado puntos mediante señales; las cotas de estos puntos sirven luego de apoyo para los trabajos siguientes. Estas redes fundamentales, hechas con la mayor precisión posible, se denominan *de alta precisión o geodésicas*; las señales empleadas para materializar estos puntos con cota de alta precisión suelen ser clavos gruesos empotrados en piedra que ofrezca garantía de permanencia.

Con todos estos procedimientos resultan conocidos el par de coordenadas X, Y de una serie de puntos del terreno y la cota Z de otro conjunto de puntos que servirán de apoyo a todos los demás.

Operaciones topográficas complementarias

Los métodos clásicos de topografía —prácticamente abandonados ahora en todo el mundo— en cuanto se refiere a mapas topográficos de un país, consistían en unas minuciosas y largas operaciones de medida en el campo. Partiendo de los vértices de triangulación y de los puntos de cota de precisión se recorre el terreno en todas direcciones siguiendo las líneas notables (divisoria, arroyos, vaguadas, vías de comunicación) mediante itinerarios taquimétricos, entre cada estación, de los cuales se miden las distancias y los

OYA

484
(19-19)

ángulos acimutales y cenitales. Simultáneamente se dibujan croquis, que después sirven de ayuda para la interpretación de los datos.

El empleo de la fotografía aérea ha simplificado algunas de estas operaciones y ha mejorado, sobre todo, el resultado obtenido. Disponiendo de las fotos aéreas de la zona se identifican en el terreno un cierto número de puntos que sean visibles en ellas, y mediante operaciones topográficas y arrancando de vértices geodésicos y de puntos de nivelación se obtienen los datos que permiten calcular las coordenadas de estos *puntos de apoyo*; este trabajo, aunque preciso, exige mucho menos tiempo que el antes citado.

Operaciones fotogramétricas

Se llama fotogrametría a la técnica que estudia el conjunto de operaciones realizadas posteriormente con es-

tos datos y con las fotografías. Una vez se pretende obtener coordenadas de más puntos, en otras ocasiones el objetivo perseguido es obtener nuevas fotografías que sean proyecciones ortogonales en vez de cónicas.

Pero lo más frecuente es el empleo de aparatos llamados *restituidores*, que dibujan mecánicamente todos los elementos del mapa si con un adecuado procedimiento óptico un operador va examinando una imagen tridimensional del terreno (modelo) producida por observación estereoscópica de las fotografías conseguida al colocar debidamente éstas, de forma que ocupen las posiciones relativas que tenían en el espacio cuando fueron impresionadas.

La preparación de esta operación es muy minuciosa, ya que para ello hace falta que cada fotografía ocupe la misma posición respecto al objetivo de la cámara (lo que se logra por la operación llamada orientación interna) y además que también queden bien colocadas respecto al plano horizontal (orientación externa).

Las operaciones de orientación externa se basan en la determinación de coordenadas de un cierto número de puntos situados en los pares fotográficos, partiendo de las coordenadas del terreno de otros puntos que han sido halladas por métodos topográficos (puntos de apoyo); se utilizan métodos llamados de aerotriangulación que comienzan por medidas hechas en unos aparatos de gran precisión llamados monocomparadores o estereocomparadores, que obtienen rápidamente las coordenadas de los puntos medidos, después de ser tratadas en procesos de cálculo que sólo los ordenadores han hecho posibles en la práctica.

Realizada la orientación de los pares, el trabajo se reduce a identificar en el modelo cada elemento topográfico y seguirlo con un índice luminoso que se mueve con un triple mando (x , y , z); el movimiento necesario se traduce en un movimiento mecánico que un pantógrafo multiplica para que un lápiz (u otro elemento gráfico) en el extremo del brazo móvil dibuje en una hoja previamente preparada la minuta fotogramétrica.

La minuta fotogramétrica es mucho más detallada que la formada por

topografía clásica, pues su dibujo se realiza a la vista de todos los puntos del terreno, mientras que para la de topografía clásica sólo se dispone de un número limitado de ellos.

Ortoproyección

La fotografía aérea es una proyección cónica del terreno, es decir, realizada a través de rectas que unen los puntos del terreno con un punto único (vértice de proyección o foco); sólo el eje óptico es, teóricamente, vertical.

Como un plano (caso particular de un mapa), es una proyección ortogonal de todos los puntos sobre el plano horizontal, el paso directo de fotografía aérea a plano supondría cambiar el sistema de proyección, lo cual es absolutamente imposible, a no ser que el terreno sea completamente horizontal (nótese que la restitución hace este trabajo, pero punto por punto).

Sin embargo, se ha pretendido una solución aproximada, que llega a ser correcta en la práctica si el terreno no es muy irregular. Consiste en someter a cada pequeña zona de la fotografía a un cambio de escala y una rotación adecuadas, de modo que se transforme la proyección cónica en ortogonal y recoja fotográficamente cada una de estas zonas, hasta completar el original. El aparato en que se lleva a cabo esta operación es un ortoprojector. La operación tiene que venir precedida por las orientaciones antes citadas.

Los aparatos difieren por tanto de los tradicionales en los positivos para hacer la nueva fotografía, que es una operación mucho más rápida que la obtención del perfil antes citado, por lo cual se acopla un ortoprojector a un grupo de cuatro o cinco restituidores.

El resultado es una *fotografía* ortogonal, en la que quedan muy disimuladas las uniones entre facetas de pequeñas dimensiones. La ventaja de esta ortofotografía sobre el mapa es que se conserva toda la información original; la desventaja reside en lo mismo, y en que, por tanto, hay que identificar lo interesante y seleccionarlo.

Para algunas aplicaciones puede

ser más útil que un mapa, por ejemplo para localizar determinados datos, si bien siempre con la desventaja del examen estereoscópico del par, por lo que la triple utilización (par, ortofoto y mapa) puede ser el mejor método para lograr mapas temáticos de precisión.

Si se introducen en un programa de ordenador los datos de los perfiles verticales antes citados se puede obtener fácilmente el dibujo de las curvas de nivel que se deseen, el cual, como ha sido obtenido por puntos aislados, es de menor precisión que el que resulta de la restitución normal.

Otros datos del mapa

Muchos datos necesarios del mapa no son de tipo físico, ya que para conocerlos no bastan los trabajos de campo ni las fotografías. Tal ocurre con los topónimos, que es preciso averiguar consultando a los habitantes de la zona y depurar en lo posible mediante una cuidadosa investigación; o con los límites de las divisiones administrativas, que en teoría están señalizadas mediante hitos y cuyo trazado es preciso incorporar al mapa superponiendo su dibujo, obtenido por otros medios.

Separación de colores

Esta minuta, obtenida por procedimientos clásicos o fotogramétricos, es un mapa dibujado con precisión, pero sin pretensiones estéticas en su presentación. Y, sobre todo, es un solo ejemplar, que, aunque esté dibujado en varios colores, no se puede reproducir con nitidez más que en uno sólo (copias fotográficas en negro, que se hacen en un caso extremo).

La preparación de un mapa impreso en varios colores, partiendo de la minuta, es una operación delicada en la que se une la exactitud en la conservación del dibujo original con el arte en la obtención de un dibujo claro y agradable. Se llama *separación de colores* (o dibujo de originales) a esta operación, a cargo de especialistas llamados delineantes cartográficos,

que utilizan cada vez recursos más nuevos de la técnica.

Los métodos y materiales empleados han variado mucho con la evolución de las técnicas cartográficas; los procedimientos clásicos, como el grabado en cobre y la litografía, han desaparecido; y también se ha abandonado el dibujo sobre el papel.

En la actualidad la minuta se fotografía y del negativo obtenido se sacan tantas copias positivas como colores han de imprimirse. Estas copias se hacen a la escala que tendrá el mapa impreso, que puede no ser la de la minuta. El material sobre el que se hacen las copias tiene una base rígida y transparente (cristal o plástico indeformable) sobre la que se ha extendido la emulsión fotográfica. En cada una de estas copias aparece fotografiada la totalidad del mapa, pero el delineante marca en cada caso solamente las líneas que han de imprimirse con un determinado color. Realiza esta labor con un punzón especial, que pasa sobre la línea eliminando la emulsión fotográfica (esgrafiado) y dejando al descubierto el soporte transparente. Se forman así tantos *originales* como colores vaya a tener el mapa. La rotulación generalmente, se añade a las copias positivas del negro y el azul. El procedimiento primitivo para obtenerla era el rotular a mano directamente; ahora lo normal es componer los rótulos en máquinas especiales, fotografiarlos sobre material transparente y adhesivo y colocarlos en su lugar correspondiente. De forma análoga se procede con los fondos de colores, con los signos, etc.

Cartografía automática

Cada vez se emplean más recursos automáticos en la producción de mapas, tanto para conseguir mayor uniformidad en el resultado como para lograrlo con mayor economía. Pero es muy variable el grado de utilización en cada una de las fases.

Es general el empleo del *coordinatógrafo*, que, originariamente, es un aparato que puede marcar, dibujar o pinchar puntos en un papel o soporte adecuado, cuyas coordenadas carte-

sianas se le comuniquen con un teclado sencillo. Esto se emplea hace muchos años para obtener con gran precisión la posición de los vértices geodésicos, de puntos notables del mapa, puntos de apoyo fotogramétrico, de esquinas del cuadrículado y del marco; un perfeccionamiento ulterior permitió comunicarle estos datos a través de un lector de fichas perforadas o de cinta magnética.

Otro perfeccionamiento consistió en la posibilidad de trazar rectas entre dos puntos, con lo que se dibujan marcos y cuadrículas; después se adoptaron programas para trazar curvas geométricas, empleándolas en representación de paralelos y meridianos, y, por último, curvas de cualquier tipo descompuestas en arcos que unan puntos que, por su proximidad, puedan parecer líneas continuas.

Esta fase, que ya puede denominarse cartografía automática, ha de iniciarse con un proceso de digitización, es decir, de toma de coordenadas de puntos, todo lo próximo que se quiera, situados en líneas dadas (curvas de nivel, costas, ríos, caminos, líneas, límites, etc.); las cintas o discos así obtenidos alimentarán en su momento al coordinatógrafo.

Este trabajo ha de hacerse con la misma precisión que el esgrafiado manual, pero en la práctica es más seguro y rápido; la ventaja esencial es que el coordinatógrafo consigue curvas muy uniformes, que pueden ser continuas, de trazos, dobles, etc. También existe la posibilidad de marcar signos convencionales y dibujos uniformes, así como cotas y números (y letras) en general. Para la rotulación se han hecho numerosos ensayos y el resultado no es definitivo, porque no se puede suplir la iniciativa personal.

El paso siguiente, en el que se trabaja intensamente, es obtener la separación de colores directamente a partir de la restitución fotogramétrica. Un método que se emplea ya en plena producción es archivar en banco de datos el resultado de cada "color" de la restitución (altimetría, hidrografía, etc.) una vez depurado de posibles errores y superposiciones.

Esta depuración es esencial, pues puede ocurrir que dos isohipsas se su-



Averiguar la posición de una serie de puntos respecto a otros equivale a conocer las distancias que los separan y las figuras geométricas que se forman al unirlos entre sí. (Taquímetro Troughton.)

perpongán, o que ríos, curvas de nivel y líneas de comunicación se agolpen, así como las construcciones. La representación del dibujo conjunto en pantallas, con la ampliación que haga falta, permite al revisar, borrar y colocar de nuevo los datos en la posición conveniente para la obtención de una imagen clara.

No hay problema en variar la escala del mapa ni en cambiar de proyección, por lo cual del material archivado se puede obtener una gran variedad de mapas, entre los que nos pueden interesar mapas simplificados de base sobre los que se puede preparar cartografía temática.

Impresión

El dibujo de cada original pasa por medios fotográficos a una plancha, que es la que, adaptada a los rodillos de una máquina impresora, transmite el dibujo del color correspondiente al papel. Las sucesivas impresiones de todos los originales, cada uno con la tinta de su color, completan el mapa. Es necesario, naturalmente, que el ajuste entre los distintos colores sea perfecto y que las operaciones finales no hayan introducido

defectos en el mapa. Pueden también existir deformaciones posteriores a la impresión por la aparición de dilataciones o contracciones en el papel.

Actualmente las técnicas de las artes gráficas están muy avanzadas y en teoría estos problemas están superados, pero a la hora de manejar un mapa es necesario recordar su posible existencia, especialmente si es preciso hacer coincidir hojas contiguas cuya edición sea de fecha distinta.

Modernización de mapas

Los mapas quedan anticuados con el tiempo, pues en el terreno se producen modificaciones a veces muy notables, sobre todo en las zonas muy pobladas. Tal ocurre con la aparición de nuevas vías de comunicación, crecimiento de ciudades, construcción de embalses, etc.

En ocasiones los cambios son tan grandes que el mapa resulta completamente inútil para su empleo, y su interés queda reducido al de testimonio histórico; se debe sustituir entonces el mapa por otro de nueva realización.

Otras veces las modificaciones no son tan extremas y el mapa aún es

utilizable, con una actualización apropiada. En estos casos se registran los datos distintos en el campo, y sobre todo, en nuevas fotografías aéreas; con ellos se corrigen las minutas y las modificaciones se incorporan a los originales. Unas planchas nuevas permiten imprimir el mapa ya modernizado.

Los mapas de formación indirecta

Son los obtenidos a partir de otros ya existentes mediante copia y selección de sus datos. Se forman normalmente a escalas menores que los mapas de que proceden los datos, sintetizándolos convenientemente. Se suele llamar *compilación* a este proceso.

El trabajo previo es la recopilación de datos, pues frecuentemente es necesario emplear información procedente de varios mapas de origen distinto, a distintas escalas y en diferentes proyecciones.

Reunida la información se procede al dibujo de la nueva minuta, de la que por métodos análogos a los antes citados se obtendrán los mapas impresos.