

EN TORNO A LA TOPOGRAFÍA

FRANCISCO MANUEL MARTÍNEZ FERNÁNDEZ
PROFESOR TITULAR DE LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA DE MADRID

Introducción

PODRÍAMOS decir que la topografía pretende dotarnos del conocimiento del entorno en que vivimos; coloca a escala humana, y para nuestro uso, el universo que nos rodea.

La topografía estudia la representación de la Tierra, en lo que se refiere a su superficie, objeto tridimensional, que deberemos reducir a un documento, el mapa en su concepción clásica, que sea un modelo de la realidad fácilmente manejable. Este documento tendrá mucho de inventario, en donde se recogen los recursos naturales, la infraestructura, los accidentes geográficos, y en general cualquier fenómeno que tenga un desarrollo espacial.

La topografía tiene en su estudio una amplia libertad; podrá hacerlo a escala planetaria, continental, nacional, regional e incluso de carácter individual.

Son tantos y tan variados los trabajos topográficos, que convivimos con ellos desde que nacemos, las casas, las calles, las carreteras fueron primero un plano topográfico que después se colocó, replanteó, en el terreno para hacer posible su construcción. Incluso cualquier paisaje que nos deleite, lo más probable es que también esté cartografiado por medios topográficos. Aunque definir una ciencia es limitarla, es preciso, para

lograr un entendimiento general, proporcionar una síntesis de la ciencia en cuestión.

Podríamos definir a la topografía como la ciencia y el arte de efectuar el conjunto de medidas y cálculos para

determinar la configuración y posiciones de las características y recursos, naturales y artificiales de la Tierra y representar estas características en mapas, planos o a través de otro medio.

Esta definición nos permite cono-



La topografía pretende dotarnos del conocimiento del entorno en que vivimos, colocando a escala humana el universo que nos rodea.
(Mapamundi de 1587. Atlas Portulan, J. Martínez. Biblioteca Nacional. Madrid.)

cer las fuentes de información de esta disciplina; la Tierra en general y muy particularmente su superficie. La forma de adquirir esta información es mediante la realización de medidas según métodos determinados y el objetivo a conseguir es representar las características y geometría del terreno, en mapas u otro medio.

Ámbitos de la topografía

Es tan grande la fuente de información, la superficie de la Tierra y tan amplio el abanico de las finalidades, las necesidades de documentación del hombre, que difícilmente podremos detallar aún los más importantes de estos objetivos.

Los levantamientos más antiguos conocidos fueron las medidas de predios. Marcar límites y dividir terrenos es una labor continua en el quehacer de la topografía. Dentro de este con-

junto, podremos considerar todas las determinaciones debidas a las actividades transaccionales del hombre y las que incumben a la realización de inventarios, normalmente acometidas por los estados debido a su gran magnitud.

En este último punto hacemos referencia a todos los tipos de levantamientos catastrales, que de una forma u otra son una necesidad general de un país.

Los levantamientos cartográficos de mapas con información básica, esenciales por sí mismo y necesarios como marco geográfico de la representación de fenómenos con referencia en la superficie terrestre, han sido la ingente labor de la llamada topografía clásica, hoy eficazmente sustituida por la fotogrametría.

Levantamientos especiales, como los núcleos urbanos, o de pequeña extensión, continúan realizándose por los métodos clásicos.

Las obras de ingeniería cuya ubicación se realice sobre o bajo la superficie de la tierra, necesitan de un detallado conocimiento del terreno, antes, durante y después de su ejecución. En estos levantamientos tiene especial preponderancia las exigencias de precisión, causa que requiere un madurado conocimiento de los métodos topográficos, una hábil ejecución y un cuidadoso cálculo. Sin entrar a enumerar las clases de levantamientos de ingeniería, pues sería necesario nombrar todas las ramas, si distinguiremos dos tipos que están presentes en todas ellas: los levantamientos de proyectos y ejecución y los de control.

Los primeros, indispensables para el diseño y la realización, son labor común en la topografía. Los levantamientos de control han conseguido, con las ayudas del aumento de precisión en la medida y de rapidez en el cálculo, una utilización am-

plia y segura en muchos campos de la ingeniería, en especial en estudios de deformaciones de estructuras, montajes industriales, auscultación de grandes áreas del terreno, como laderas, taludes y un largo etcétera.

Las actividades del planeamiento, tanto urbano como territorial, la necesidad de realizar inventarios de recursos naturales y la exigencia de su mantenimiento, demandan una gran diversidad de trabajos topográficos, que junto a los de configuración y los hidrográficos constituyen otro de los objetivos de la topografía.

Citaré por último, los modernos sistemas de posicionamiento, que se realizan con éxito en las naciones tecnológicamente más adelantadas como tarea encomendada a los topógrafos.

Es evidente que los levantamientos no son documentos de información estática, ya que su fuente de información posee un continuo dinamismo. Esta especial característica subyace en todos los objetivos de la topografía.

La topografía tiene un papel importante en el desarrollo de un país; a este respecto recordemos las palabras de Melchor Gaspar de Jovellanos que decía: "Mapa, sin cuya luz la política no formará un cálculo sin error, no concebirá un plan sin desacierto, no dará sin tropiezo un solo paso: sin cuya dirección la economía más prudente no podrá, sin riesgo de desperdiciar sus fondos o malograr sus fines, emprender la navegación de un río, la abertura de un canal de riego, la construcción de un camino, o de un nuevo puerto, ni otro alguno de aquellos designios que, abriendo las fuentes de la riqueza pública, hacen florecer las provincias y aumentan el verdadero esplendor de las naciones".

Como resumen podríamos decir que no es fácil encontrar algo, cuya representación métrica se precise que no pueda o no deba obtenerse topográficamente.

Dentro del ámbito científico, la topografía nació como geometría aplicada, fue el desarrollo práctico de los conceptos teóricos que se alcanzaban. Tanto infunde la geometría las operaciones topográficas que se ha llegado a decir: "la topografía es la geometría más una medida de comprobación" y





Los orígenes de la topografía se remontan alrededor del año 1400 a.C., en Egipto. (Monolito del templo de Karnak. Luxor. Egipto.)

así fue durante largo tiempo. Se basa por tanto la topografía en la geometría para definir sus métodos. "Geometría" y "Topógrafo": han sido sinónimos en castellano, y aún lo son en francés.

Para desarrollar los principios de funcionamiento de los instrumentos de medida, la topografía se fundamenta en la física, principalmente en la óptica y recientemente en la electrónica.

Una de las labores más arduas, en el trabajo topográfico, es la del cálculo de las observaciones hechas en el campo. El cálculo numérico es imprescindible en el tratamiento de la información topográfica, hoy día auxiliado por los métodos informáticos.

Para un uso crítico de las medidas y de sus resultados se basa la topografía en la estadística matemática y en el ajuste de observaciones.

La geodesia estudia la forma y dimensiones de la Tierra, la topografía se apoya en ella y la complementa, siendo tal el grado de compenetración que es difícil establecer una línea de separación entre ambas.

El dibujo, la teoría del grafismo y las artes gráficas enlazan la topografía con la cartografía, ya que la información que se obtiene debe expresarse gráficamente. Por último la informática irrumpe, como en casi todos los campos, en el campo de la topografía, con las ayudas en el cálculo, los grandes bancos de datos, los sistemas de información geográfica, la restitución analítica, los sistemas de posicionamiento, etc.

Evolución histórica

La topografía es una de las ciencias y artes más antiguas practicadas por el hombre. Sus orígenes se confunden con los de la geometría, astronomía y los de las matemáticas en general.

Los orígenes del arte de medir el terreno se pierden en la oscuridad de los tiempos. Su historia comienza con la de la propia civilización.

Ciñendonos a los registros históricos más antiguos, referidos a la topografía, vemos que tuvo su comienzo en Egipto. Según cuenta Herodoto,

alrededor de 1400 a.C. fueron divididas las tierras de Egipto con fines impositivos. Las inundaciones del Nilo hacían desaparecer anualmente los linderos de los predios y se designaron a unos hombres para rehacer los límites. Parece que existe desde el principio de la historia, y a lo largo de ella, una unión entre el Catastro y la topografía. Estos primeros topógrafos fueron llamados "estiradores de cuerdas" porque sus operaciones topográficas las realizaban con una cuerda marcada a determinadas distancias correspondientes al valor de la unidad medida.

Desarrollada por los filósofos griegos, la geometría pronto florecería su aplicación práctica. En esta aplicación práctica destacan Eratóstenes, que en el año 200 a.C., mide con exactitud el radio de la Tierra usando métodos geométricos, y Herón, que alrededor del año 120 a.C., fue el autor de un verdadero tratado de ingeniería llamado *La Dioptra* en el cual relaciona los métodos de medición con problemas geométricos y los cálculos necesarios para el trazado de planos. El instrumento por él diseñado, la dioptra, consta de dos ejes, uno vertical y otro horizontal, de forma muy similar a los de los actuales teodolitos. Las visuales se dirigían por medio de una alidada de pínulas que se le añadió después.

La mentalidad eminentemente práctica de los romanos imprimió un desarrollo notable a la topografía.

El papel del agrimensor en la sociedad romana es de gran relevancia a todo lo largo de la historia, ya que interviene en el reparto y en el sistema de explotación de la tierra, en el trazado de las calzadas y en el de nuevas poblaciones. Los agrimensores comienzan perteneciendo a la clase sacerdotal, siendo los augures los primeros en ejercer esta función.

Además existían los geómetras; éstos tenían un carácter más teórico que los agrimensores y eran los principales maestros del arte de medir. Séneca, en sus *Cartas Morales a Lucilio*, y precisamente en la que se refiere a las artes liberales, expone las enseñanzas del geómetra en el desarrollo de su discurso moral.

Con el crecimiento del Imperio, las necesidades burocráticas y técnicas se hacen mayores y los agrimensores pasan del campo religioso al civil. Los ritos religiosos dependen de los sacerdotes y las operaciones técnicas quedan a cargo de los agrimensores.

Durante la República eran profesionales liberales; el Imperio los convierte en funcionarios públicos encargados, además de sus labores normales, de la delimitación de las provincias que se conquistaban y de las colonias que se establecían.

La organización de los agrimensores, comienza a perder vigencia con Justiniano y completa su decadencia con las invasiones bárbaras, que no tienen en cuenta sus reglamentos ni su institución. En las colecciones de leyes de los reyes ostrogodos no se conservan disposiciones sobre la agrimensura.

Los instrumentos utilizados por los agrimensores romanos, provienen de los griegos, y los conocen a través del pueblo etrusco.

Los principales son: el Gnomon que sirve para obtener la orientación y medir el tiempo.

La Groma, que consiste en dos sistemas de plomadas que materializan planos perpendiculares y que se utiliza para medir ángulos, trazar alineaciones y sobre todo para dividir el

campo según dos grandes ejes, el decumanus y el cardo máximo; siguiendo el cardo la meridiana y el decumanus una línea que marca la dirección este-oeste.

Para medir desniveles se usa el chorobates, que consta de una regla larga en cuyos extremos hay unos brazos de igual medida unidos con escuadras a la regla principal. De ésta penden plomadas que indican cuándo la regla está horizontal. Era habitual que la regla principal tuviera una ranura que se llenaba de agua y servía de nivel.

La obra escrita más importante de este período fue la de Frontino, agrimensor encargado por el emperador Nerva en el año 97 de la distribución de aguas a Roma, que publicó dos volúmenes con procedimientos de agrimensura.

En la Edad Media el estudio de la geometría se hace teórico y se refugia en los conventos, en donde lo cultivan los monjes. San Isidoro de Sevilla escribe sobre geometría y agrimensura; a estos tratados y a su mapa mundial simbólico debe su consideración de patrono de las Ciencias Geográficas.

Se producen avances en la astronomía y la navegación, pero muy pocos en la agrimensura práctica; hasta tal punto, que al final del siglo X, el abad Gerberto debe remitirse a obras de agrimensores romanos que le

sirven como base para su tratado de geometría aplicada.

Alfonso X el Sabio dirige la preparación de unas tablas planetarias que se publican en el año 1252. Estas tablas fueron las mejores de su época y tardaron varios siglos en ser mejoradas; fue grande su influencia en la navegación, por su empleo en la orientación por medios astronómicos.

Durante este siglo se escriben dos obras eminentemente topográficas: la *Práctica Geométrica* y el *Libre Quadratorum*, que trata principalmente de instrumentos y describe minuciosamente el cuadrante de los observatorios.

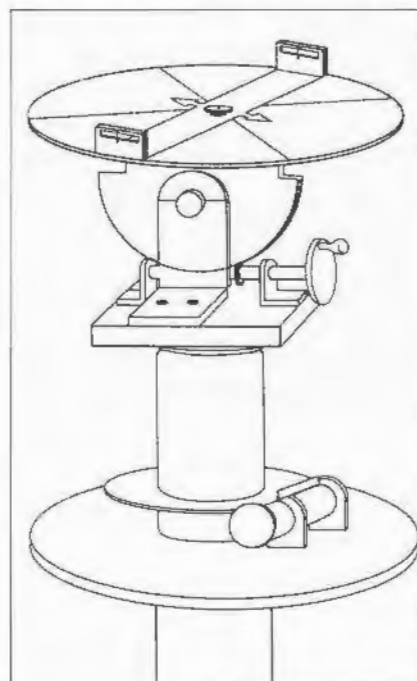
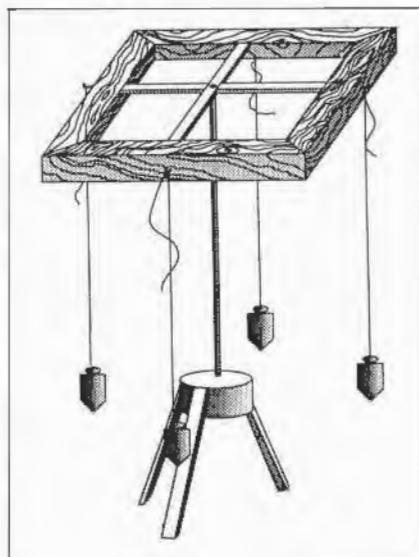
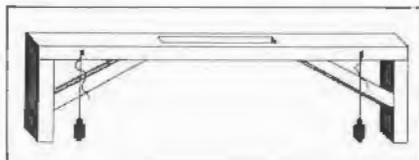
Durante el siglo XVI, se diseñan el teodolito, la plancheta y las tablas trigonométricas.

En 1671, Snellius utiliza por primera vez el método de la triangulación y establece la prioridad de las observaciones angulares sobre las de distancia, circunstancia que ha tenido vigencia hasta que en nuestra época se consigue la medida electrónica de distancias.

Durante los siglos XVIII y XIX, por necesidades militares y por la amplitud de las tierras colonizadas, se plantea el problema de cartografiar áreas cada vez de mayor extensión, lo que requiere conocer la curvatura terrestre y establecer una triangulación de precisión.

La dificultad de lograr limbos, de tamaño adecuado al trabajo de campo, divididos con exactitud dificulta las tareas de medición.

Comienza el estudio de la división de limbos, y en ello destacan artesanos ingleses como Jesse Ramsden que logra un teodolito geodésico utilizado en la triangulación inglesa, también Edward Troughton que construye teo-



Los instrumentos utilizados por los agrimensores romanos provenían de los griegos, que los conocían a través del pueblo etrusco. (De arriba a abajo e izquierda a derecha, reconstrucción del chorobates, de la groma y de la dioptra de Herón.)

dolitos, que han dado un excelente resultado hasta mediado nuestro siglo.

Posteriormente, las industrias suiza y alemana de óptica construyen los aparatos que se usan en Europa.

Actualmente, la industria japonesa ha entrado en el mercado de instrumentos topográficos junto a las anteriormente citadas.

Estado actual

La variación de los instrumentos de medida ha tenido una amplia repercusión en el quehacer de la topografía.

La mayor precisión en la medida de ángulos que en la medida de distancias, condiciona los métodos de trabajo y las posibilidades de la técnica topográfica durante varios siglos. Hasta tal punto, que desde que Snellius establece su sistema de triangulación, los métodos se han basado en la medida de los ángulos, obviando, en todo lo posible, la medida de las distancias.

rango de precisión que la de los ángulos.

El siguiente fue la medida electrónica de los valores angulares, que permite la transmisión de los datos topográficos por medios electrónicos.

De forma paralela, la influencia del ordenador se hace sentir principalmente en los siguientes campos:

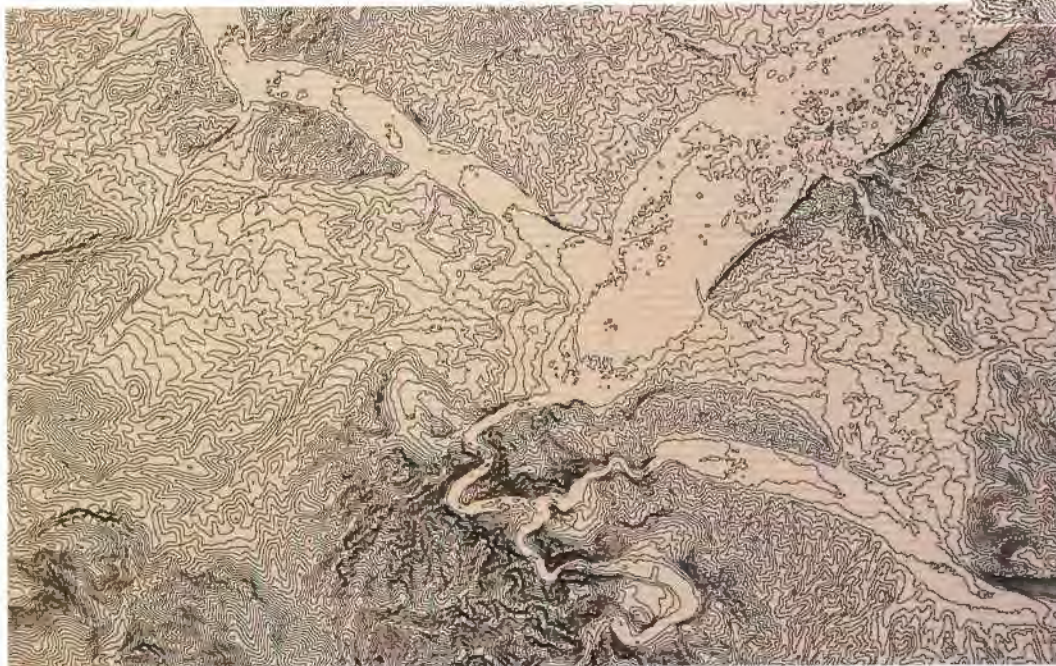
- Aumento de la rapidez y de la precisión en los cálculos.
- Mayor velocidad y habilidad en la transmisión de los datos.
- Amplia capacidad de almacenamiento de la información.
- Versatilidad en la utilización gráfica y numérica de la información almacenada.
- Posibilidad de utilizar técnicas de simulación para la optimización de los trabajos, con el consiguiente ahorro de recursos.

tos que utilizan una onda electromagnética de características análogas a las de la luz y los instrumentos que utilizan microondas; la razón es que nacen de experimentos distintos.

Alrededor del año 1941, el geodesta sueco Erik Bergstrand diseña un experimento para medir la velocidad



Curvas de nivel *brutas* y curvas de nivel *suavizadas*



Tres factores han influido profundamente en las últimas décadas en la instrumentación topográfica y por ende en la topografía.

El más antiguo es la medida electrónica de distancias, hecho que coloca la medida de distancias al mismo

El análisis de la totalidad de las observaciones de campo, garantiza un control de la calidad del producto final, que de otra forma es prácticamente imposible abordar.

La medida electrónica de la distancia tiene dos vertientes: los aparatos

de la luz, conociendo, con gran precisión, la distancia recorrida.

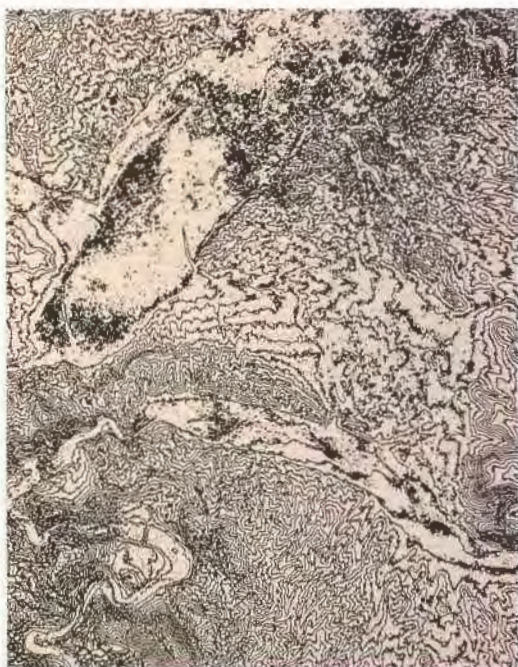
El éxito es tan grande que se piensa en invertir el proceso y medir las distancias una vez conocida la velocidad de propagación de la onda. En 1947 se logra construir un aparato que mide distancias con gran precisión. La construcción y comercialización corre a cargo de la Compañía Aga.

Al final de la Segunda Guerra Mundial se diseñan, utilizando microondas, aparatos de radar para la detección de aeronaves.

En 1957, T.L. Wadley en el National Institute of Telecommunications Research of South Africa construye el primer medidor electrónico de distancias utilizando microondas. Lo construye y comercializa la casa Tellurometer.

Actualmente, el mercado está dividido entre ambos sistemas, que han desarrollado cualidades que satisfacen a sectores distintos.

Los medidores que utilizan ondas cercanas a la luz, infrarrojo y láser, han logrado una precisión centimétrica en medidas de distancias de hasta



quince kilómetros, utilizando reflectores pasivos. Estos reflectores consisten en prismas convenientemente tallados para que devuelvan la emisión en la misma dirección y sentido contrario al que incide, logrando de esta forma una dispersión mínima.

La miniaturización conseguida en estos años ha sido grande hasta el punto de poder ser integrados en los aparatos clásicos de topografía sin apenas aumento de volumen; utilizando una fuente de alimentación también de pequeño tamaño. Las precisiones usuales en estos instrumentos son del orden de $\pm (5 \text{ mm} + 3 \text{ mm/km})$.

Los instrumentos de microondas se han especializado en grandes distancias; hoy día alcanzan hasta ciento cincuenta kilómetros, con una precisión del orden de $\pm (10 \text{ mm} + 3 \text{ mm/km})$. Su tamaño es sensiblemente mayor, su fuente de alimentación también lo es y precisan reflectores activos, es decir, necesitamos dos aparatos idénticos uno en cada extremo

de la distancia a medir, de forma que cuando un extremo emite el haz de microondas, el otro aparato lo recibe, lo amplifica y lo vuelve a emitir en la misma dirección y sentido contrario, con la misma fase con la que lo recibió. Se logra así medir una distancia, que como hemos dicho, es mucho mayor.

Durante más de una década, el equipo del Topógrafo se componía por una parte del aparato óptico de medir ángulos y del distanciómetro o medidor electrónico de distancias por el otro. Estábamos en una situación en la que la tecnología lograba un aparato de medir distancias con gran precisión y sin embargo no podía sustituir aún a los instrumentos de lectura óptica.

La automatización de las lecturas angulares era una meta perseguida por todos los científicos involucrados en la construcción de instrumentos topográficos.

Se comenzó utilizando un método, el de la codificación, que había dado buenos resultados en otras áreas; pero aunque se construyeron algunos aparatos con este sistema, la precisión que se conseguía era mucho menor que la de los aparatos de lectura óptica. Hasta que la tecnología no avanzó más, no fue posible construir elementos electrónicos capaces de medir el giro de una alidada.

El fundamento actual consiste en medir un parámetro electrónico, un patrón de interferencias, un flujo sinusoidal de voltaje, etc., que está íntimamente unido al giro del aparato, de forma que conociendo el parámetro nos es posible conocer el ángulo.

Así se ha conseguido una precisión análoga a la de los instrumentos ópticos sin un aumento apreciable de tamaño.

Además es importante reseñar que las lecturas angulares se obtienen, lo mismo que las distancias, de forma automática y digital.

Lograda la medida electrónica de distancia y del ángulo, se pasa a integrar ambos elementos en un aparato topográfico; de esta integración surge la que llamamos Estación Total.

En un principio la estación total es un aparato que mide de forma electrónica las distancias y los ángulos,

estando integrados en el propio aparato los sistemas de medida. Este nuevo aparato necesita para las medidas angulares utilizar un microprocesador, elemento que se utiliza para aumentar las prestaciones del aparato. En efecto, hoy casi todas las estaciones totales realizan cálculos de reducción, reducida y desnivel, de coordenadas, absolutas y relativas, de orientación, etc., y tienen programas de trabajo, como los del cálculo de elevación remota y del replanteo por polares.

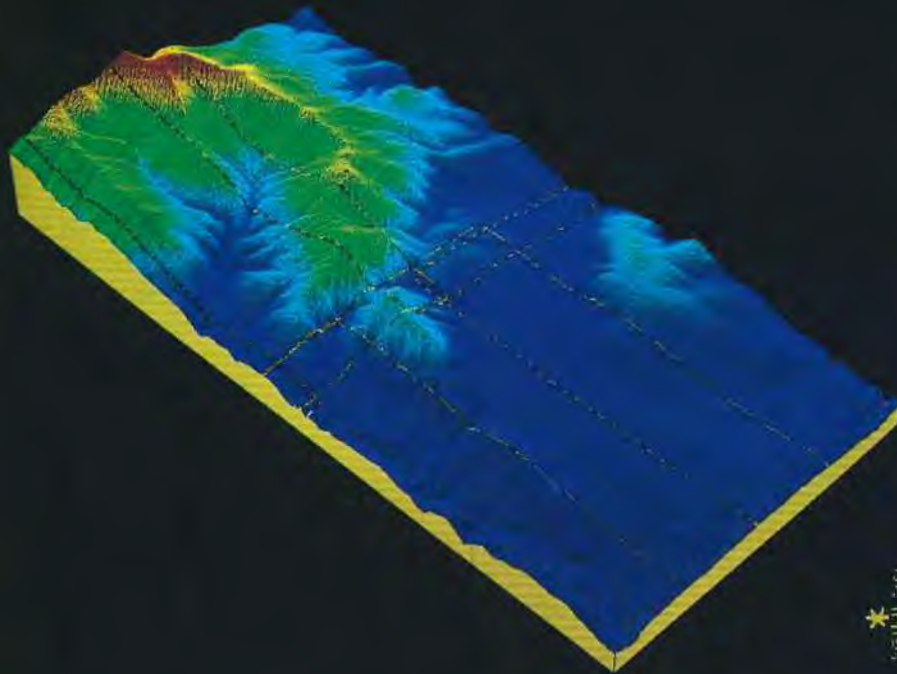
Pero no es esto lo más importante, al tener un microprocesador es posible utilizarlo para comunicarlo con otro. Las estaciones totales pueden enviar sus datos a otro procesador que los almacena y los trata posteriormente.

Debido a esta posibilidad nace la "Libreta Electrónica" que es un colector de datos capaz de adquirir información de un instrumento electrónico, manipularla y por fin transmitirla a un ordenador o al propio aparato. La gama de colectores de datos va desde el que simplemente almacena información y la transmite, hasta los que son ordenadores portátiles que permiten su programación. En general aparte de las habilidades de comunicación permiten el tratamiento de los datos según programas topográficos que representan una eficaz ayuda para los trabajos de campo.

El nuevo equipo, una estación total conectada a una libreta electrónica, permite, en algunos casos, un ahorro de tiempo de campo de hasta un cincuenta por ciento, aumentando la cuota de productividad en la misma cantidad. Es de hacer notar que una estación total está infrautilizada si no se le acopla una libreta electrónica que permita la automatización completa de la toma de datos de campo.

Tradicionalmente, en topografía los datos de campo se calculaban en el gabinete; esta labor de cálculo era tediosa y larga, hasta que el ordenador intervino con gran eficacia.

La mayor parte de las casas constructoras de instrumental topográfico han elaborado aplicaciones programadas que permiten el tratamiento de la información recogida en campo. Estos programas están coordinados con los



Los topógrafos deben adaptarse a cambios de situación y convertirse en directores de un proceso que, por lo veloz, exige cada vez mayor rapidez en la toma de decisiones. (Altimetría en falso color representada tridimensionalmente.)

equipos de toma de datos, estación total y libreta electrónica, de forma que vertida la información en el ordenador, el tratamiento es sencillo y eficaz.

Estos programas tienen, como las libretas, una amplia gama; permiten el cálculo de elementos topográficos, el curvado del plano mediante el tratamiento del modelo digital del terreno que son capaces de formar a partir de la información de campo. En dibujo de la planimetría y de la altimetría del plano en diversas circunstancias y escalas es una aplicación común a la mayor parte de estos programas.

El diseño, tanto planimétrico como altimétrico, se aborda para trabajos topográficos como urbanizaciones, obras lineales, etc.

En el estudio de las obras lineales, aprovechando el modelo digital del terreno, es posible la construcción y el dibujo de los perfiles longitudinales y transversales, así como el cálculo del movimiento de tierras, teniendo en cuenta las distintas etapas de la obra y las secciones tipos correspondientes.

Por último, estos programas permiten la carga de datos desde otros aparatos, como digitalizadores, restituidores, etc.

En realidad, si consideramos la toma de datos y su gestión como los dos componentes de un Sistema de Información Geográfica; el conjunto

integrado por una estación total, un colector de datos y un ordenador con sus aplicaciones programadas es un Sistema de Información Geográfica en miniatura y trabajando casi en tiempo real. La captura de los datos se hace con la estación total, la transmisión con el colector de datos y la gestión con el ordenador y sus programas. La precisión en la medida de la distancia, la medida digital del ángulo y la utilización del ordenador, han permitido sistemas de determinación de coordenadas tridimensionales muy precisos y que trabajan en tiempo real.

Estos sistemas se componen de dos teodolitos digitales o dos Estaciones Totales unidos a un ordenador que trata la información. Para trabajar, se comienza estableciendo las coordenadas de los dos instrumentos de la forma más precisa posible, ya que será la base desde la que se realizarán todas las medidas. Las punterías se hacen al mismo punto, generalmente señalado con láser, desde ambos instrumentos. Las observaciones se recogen en el ordenador que calcula, en tiempo real, las tres coordenadas del punto visado. Estas coordenadas almacenadas en el ordenador permiten el estudio de figuras, y la comparación de las medidas con patrones previamente depositados en el ordenador.

Con estos sistemas es posible realizar el control de grandes piezas, de estructuras arquitectónicas, de deformaciones y de cuantos elementos puedan describirse en el espacio por un número finito de puntos.

Se ha conseguido un alto grado de automatización en el trabajo topográfico debido principalmente a la nueva instrumentación con la que se cuenta. No se crea sin embargo que el operador, tanto de campo como de gabinete, ha perdido su importancia. En un proceso de automatización, por lo menos en topografía, la mayor importancia la tiene la persona que controla dicho proceso, pues si bien ha sido aliviada de gran parte del trabajo de rutina, transcribir en la libreta los datos leídos en el aparato, calcular, dibujar la minuta, etc., es el responsable de coordinar y dirigir todos los elementos del proceso y de una eficaz coordinación depende el éxito de la automatización.

Los topógrafos deben adaptarse a cambio de situación y convertirse en directores de un proceso, que por lo veloz, exige cada vez mayor rapidez en la toma de decisiones, lo que no se logrará sin una profunda y asentada formación acompañada por una adecuada experiencia.