GeodIS

José Antonio Peláez Montilla.
Profesor de Geofísica y Geodesia Física. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Jaén

GeodIS: Geodetic Information System. Olvidados, apartados, o simplemente desconocidos a la hora de la docencia en Geodesia, en los actualmente llamados Sistemas de Información Geodésica se almacena información relevante para la Geodesia Física.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la Geodesia se ha dividido en cuatro áreas: Geodesia Geométrica, Geodesia Matemática, Geodesia Dinámica y Geodesia Física. Esta última tiene como objetivo la determinación de la superficie física de la Tierra. La superficie geométrica de la Tierra no acostumbra a utilizarse en Geodesia debido a su complejidad e inestabilidad. En cambio, se prefiere utilizar una superficie próxima a la anterior, relativamente simple y estable (sólo sujeta a variaciones seculares) a la que se denomina superficie física. La más conocida es el geoide, pero también se utilizan el teluroide (concepto introducido por R.A. Hirvonen) y el cuasigeoide (establecido por M.S. Molodenskij, V.F. Eremeev y M.I. Yurkina).

Ciertos autores prefieren establecer una división más funcional dentro de la Geodesia, estableciendo como disciplinas de estudio dentro de ésta el posicionamiento, el campo gravitatorio terrestre y, las variaciones temporales, tanto en el posicionamiento como en el campo de la gravedad.

La información almacenada en estos sistemas de información hemos de dividirla, inicialmente, en los siguientes cuatro apartados:

- Rotación de la Tierra y orientación del eje terrestre.
- Campo gravífico terrestre.
- Geoide.
- Deformaciones de la Tierra.

Veamos el tipo de información requerida en cada caso.

2. ROTACIÓN DE LA TIERRA Y ORIENTACIÓN DEL EJE TERRESTRE

Por un lado, la velocidad de rotación de la Tierra no es uniforme; la velocidad decrece uniformemente con el tiempo, sufriendo además variaciones de tipo periódico.

Por otro lado, el eje de rotación terrestre cambia su dirección en el espacio mediante términos de tipo secular y periódico (movimientos conocidos en Astronomía Geodésica con los nombres de precesión y nutación, respectivamente) y, en relación a un sistema fijo de referencia que pudiéramos establecer en la Tierra (fenómeno conocido con el nombre de movimiento del polo o nutación libre terrestre).

Los fenómenos de precesión y nutación están relacionados con la acción de las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre el Sol y la Luna con la Tierra; al depender estos movimientos de la estructura interna de la Tierra, las discrepancias entre los valores predichos y observados proporcionan información sobre modelos para el núcleo terrestre. Los fenómenos de movimiento del polo e inconstancia de la rotación terrestre aparecen como consecuencia de pequeños cambios en el momento angular de la Tierra. Este cambio es debido a muy diversos fenómenos, entre los que se pueden citar el intercambio de momento angular entre la Tierra y su atmósfera y, entre la Tierra y la Luna, variación de la altura del nivel del mar y corrientes oceánicas, producidas por el fenómeno de las mareas, acoplamientos mecánicos entre los movimientos de los fluidos del núcleo y manto, etc.

Del establecimiento de un sistema de referencia terrestre y un sistema de referencia celeste, a los cuales referir los distintos parámetros de la rotación terrestre, así como el determinar sus valores, se encarga el *International Earth Rotation Service* (IERS), auspiciado en 1987 por la *International Astronomical Union* (IAU) y la *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG), organismo que viene a reemplazar al anterior *International Polar Motion Service* (IPMS).

El IERS se encarga de compilar y analizar los datos proporcionados por distintos centros (más de treinta) a través de diversos tipos de mediciones. Las técnicas geodésicas más utilizadas son

- Very Long Baseline Radio Interferometry (VLBI)
- Lunar Laser Ranging (LLR)
- Global Positioning System (GPS)
- Satellite Laser Ranging (SLR)
- Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite (DORIS)

Tras la integración de todos los datos, se publican diversos boletines con la información necesaria, a saber:

- Coordenadas del polo terrestre. Coordenadas x e y del polo de rotación terrestre relativas, en este caso, al llamado Polo de Referencia IERS, polo convencional utilizado como origen de colatitudes geográficas.
- Coordenadas del polo celeste. Diferencias $d\psi$ y $d\varepsilon$ entre los valores de longitud y oblicuidad del polo celeste con respecto a su posición definida a través de los modelos convencionales de precesión y nutación de la IAU.
- Tiempo Universal. Diferencia entre UT_1 y UTC, es decir, diferencia entre el Tiempo Universal sin incluir términos periódicos de tipo anual y semianual (escala de tiempo

relacionada con el fenómeno de rotación terrestre y, utilizada como argumento en Astronomía Geodésica) y el Tiempo Universal Coordinado (difiere de la escala de Tiempo Atómico Internacional en un número entero de segundos). Se impone que esta diferencia nunca supere los 0.9 s, por lo que en ciertas fechas se introduce un segundo de desfase en la escala de tiempo UTC.

- Duración del día. Se llama así a la diferencia entre la duración del día determinada astronómicamente y 86400 segundos de Tiempo Atómico Internacional. Su relación con la velocidad angular de rotación terrestre ω viene dada por la expresión

$$\omega = 72921151.467064 - 0.843994803 \cdot D$$

en donde ω viene dado en prad/s y D en ms.

3. CAMPO GRAVÍFICO TERRESTRE

El campo de la gravedad o gravífico terrestre aparece como suma de la aceleración gravitatoria (originada por la masa de la Tierra) y la centrífuga (generada por el giro terrestre) en un determinado lugar. En vez de trabajar directamente con el vector aceleración, en Geodesia Física se prefiere trabajar con la función potencial de la gravedad; la función potencial posee la ventaja de ser una función escalar, y no vectorial como la aceleración, pudiéndose determinar esta última, en el momento en que se desee, sin más que calculando el gradiente de la primera

$$\bar{g} = \nabla(V+\Phi) = \nabla W$$

en donde V es el potencial gravitatorio, Φ el centrífugo y W el gravífico.

Del potencial centrífugo se conoce su expresión explícita, función de la distancia del punto al eje de rotación terrestre; no presenta ningún problema su conocimiento. No ocurre lo mismo con el potencial gravitatorio, tal que éste acostumbra a escribirse como un desarrollo en serie de armónicos esféricos de la forma

$$V(r,\theta,\lambda) = \frac{KM}{r}\left(1 - \sum_{n=1}^{n_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n V_n(\theta,\lambda)\right)$$

en donde

$$V_n(\theta,\lambda) = \sum_{m=0}^{n} \left(J_{nm}\cos(m\lambda) + K_{nm}\,sen(m\lambda)\right) P_{nm}(\cos\theta)$$

siendo K la constante gravitacional, M la masa de la Tierra, incluyendo su atmósfera, a el radio ecuatorial terrestre, las funciones P_{nm} son las funciones asociadas de Legendre de primera clase fuertemente normalizadas y, los coeficientes J_{nm} y K_{nm} los llamados coeficientes armónicos. Conocidos estos, tenemos perfectamente definido lo que se da en llamar un modelo de geopotencial, es decir, puesto que el geoide es una determinada superficie equipotencial del campo gravífico terrestre, conocido el anterior modelo, tendremos definido el geoide.

Hoy en día se trabaja con modelos de geopotencial obtenidos combinando datos de gravedad en superficie, altimetría de satélite y seguimiento a satélites; los datos gravimétricos dan información de los coeficientes con altos valores de n (ondulaciones del geoide de corta longitud de onda), mientras que a través de los métodos de Geodesia Espacial se determinan los coeficientes que nos marcan la tendencia del geoide para largas longitudes de onda. Entre los más recientes y utilizados caben destacarse los modelos OSU91 (Ohio State University, 1991) y GEM-T3 (Goddard Earth Model, 1994), realizado por el centro *Goddard Space Flight Center* (GSFC), perteneciente a la NASA.

Este último modelo, completo hasta orden (n_{max}) 50, proporciona información del campo gravitatorio terrestre hasta de medias longitudes de onda del orden de 400 km (en el peor de los casos, en el Ecuador), estimándose un error medio cuadrático en la determinación del geoide a través de este modelo de aproximadamente unos 59 cm.

Además del conocimiento de estos modelos de geopotencial, también sería deseable en un Sistema de Información Geodésica el poder disponer directamente de los datos de gravedad medidos.

Hoy en día es posible realizar medidas de la gravedad en estaciones (con bajo nivel microsísmico, libres de variaciones locales de densidad, etc.) con errores medios cuadráticos de hasta 1μGal, es decir, 10^{-8} m/s^2; las precisiones conseguidas en Gravimetría son difíciles de igualar en cualquier otra rama de la ciencia. Estas medidas de muy alta precisión pueden utilizarse en detección de movimientos verticales de la corteza (asociados a la tectónica de placas, terremotos, rebote post-glacial, etc.), detección de variaciones en la densidad de la corteza (originadas por recargas o descargas de acuíferos, movimientos del magma en inmediaciones de zonas volcánicas, etc.), definición de un geoide más preciso, establecimiento de datums precisos para redes de gravedad, determinación de altitudes ortométricas, calibración de instrumentos de precisión y otros fines.

Para que quede clara su importancia en Geodesia, se ha de hacer notar que sólo con medidas de la gravedad realizadas con estas precisiones, es posible el detectar de forma absoluta movimientos verticales del orden de pocos milímetros (incluso menores a 3 mm).

Esto es posible gracias a una nueva generación de modernos gravímetros, como los desarrollados por el *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* (JILA), perteneciente al *National Institute of Standards and Technology* (NIST) o, el *Institute for Applied Geodesy* de Alemania (IFAG).

4. GEOIDE

El geoide es la superficie equipotencial del campo gravífico terrestre que coincide más aproximadamente con la

superficie media del mar. Aparte de definirse como la superficie física de la Tierra, se utiliza como superficie de referencia para, a partir de el, medir alturas. Un geoide de precisión nos permitiría transformar altitudes sobre elipsoide en cotas ortométricas (o en cualquier otro tipo de cota definido no desde un punto de vista geométrico sino dinámico).

El *International Geoid Service* (IGeS) es un grupo perteneciente a la *International Association of Geodesy* (IAG) entre cuyos objetivos aparece el cálculo del geoide para objetivos de tipo científico, así como la distribución de resultados y, datos y software necesarios para los cálculos de geoide.

Como se indicó anteriormente, existen modelos de geopotencial que proporcionan modelos globales (para toda la Tierra) de geoide. A falta de una mejor información, se pueden utilizar para la transformación de cotas elipsoidales en ortométricas, aunque esto no es lo deseable. Se prefieren precisiones en el conocimiento del geoide de, 1 m para fines cartográficos, 50 cm para fines geodinámicos, 10 cm para el cálculo de diferencias de cotas y, entre 10 cm y 1 cm cuando se desea determinar para el establecimiento de una superficie de referencia en Oceanografía.

Se necesitan geoides de precisión, obtenidos a través de una gran densidad de datos gravimétricos de calidad, modelos topográficos de alta resolución y modelos geológicos (modelos de densidad), contrastados a través de observaciones astronómicas de desviación relativa de la vertical y, comparación entre las cotas elipsoidales obtenidas a través de mediciones GPS y cotas ortométricas obtenidas mediante nivelación de alta precisión acompañada de observaciones de la gravedad. La metodología de cálculo utilizada pasa por el método de Stokes clásico, el método de Stokes en el dominio de la frecuencia, el método de ajuste de cruces de trayectorias o, el método de colocación mínimo cuadrática; éste último es el único en la actualidad que puede integrar datos de todo tipo.

Debemos destacar en España, por un lado el geoide de alta resolución calculado para Cataluña dentro del proyecto GeoCat (Geoide de Cataluña), denominado UB91 y desarrollado por la Universidad de Barcelona; su precisión teórica es de 0.1 ppm. También, el geoide calculado para la península Ibérica denominado IBERGEO 1994A, desarrollado por el *Instituto de Astronomía y Geodesia* (Universidad Complutense de Madrid - Consejo Superior de Investigaciones Científicas); el error medio cuadrático de las ondulaciones del geoide que se calcularon es normalmente inferior a 0.5 m.

El disponer de esta información, obviando las implicaciones desde el punto de vista científico, sería de gran ayuda para los profesionales de la Topografía, Geodesia o Cartografía.

5. DEFORMACIONES DE LA TIERRA

Los distintos métodos de Geodesia clásica y Geodesia Espacial, así como las medidas de la gravedad realizadas no sólo en zonas continentales sino también oceánicas, se han mostrado como potentes herramientas a la hora de obtener información de las distintas deformaciones que se producen en en la Tierra. Es posible conocer las deformaciones producidas en superficie e incluso conocer el comportamiento de estructuras profundas como el manto.

Los datos obtenidos a través de altimetría de satélite, observaciones GPS y registros de mareógrafos, se utilizan a la hora de conocer la llamada topografía de la superficie marina, es decir, la diferencia entre el nivel del geoide y el nivel medio del mar en una determinada zona (normalmente es inferior a 1 m). El conocimiento del nivel medio del mar, utilizado como referencia, se ha hecho imprescindible en Geodesia y Oceanografía. Esto ha hecho que se creen instituciones dedicadas exclusivamente a la recopilación y tratamiento de datos del nivel del mar; este es el caso del *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), con su sede en el Observatorio de Bidston, en Gran Bretaña. En la actualidad hay importantes proyectos internacionales enfocados en este sentido, como es el caso del proyecto HIBISCUS (género perteneciente a la familia de las Malváceas, algunas de cuyas especies son reputadas plantas ornamentales), financiado, entre otros organismos, por la UNESCO y la Unión Europea. El nombre es un acrónimo de *Height Investigations to Broaden Information both on mean Sea level Changes and Understanding of Surface vertical movements in the Caribbean and adjacent regions*. Entre sus objetivos se encuentran, el establecer un sistema de referencia que permita detectar movimientos verticales del orden de 2 mm/año en un período de 5 años, detectar movimientos verticales de la corteza en el momento en que se produzcan, medir variaciones espaciales y temporales del nivel medio del mar, establecer modelos gravimétricos de alta resolución, así como observar sus posibles variaciones temporales, etc.

El conocimiento de la gravedad en el mar, así como las observaciones de altimetría radar, permiten establecer geoides marinos con cierta precisión. Esto hace que puedan detectarse ondulaciones en el geoide, o en la superficie media del mar, de larga longitud de onda, provocadas por inhomogeneidades en la densidad en el interior de la Tierra, formadas, bien por movimientos convectivos en el manto, bien por esfuerzos estáticos en la litosfera. Es posible también establecer correlaciones de estas ondulaciones con zonas de subducción o puntos calientes (la importancia desde el punto de vista de la Geodinámica es obvia). Las ondulaciones de corta longitud de onda, evidentemente, están relacionadas con la propia topografía del fondo marino o pequeñas variaciones de densidad en la litosfera.

La Geodesia Espacial ha sido de crucial ayuda para la Geodinámica. Los métodos VLBI y SLR han hecho posible el que se disponga de modelos de movimiento de placas tectónicas bastante precisos; los distintos observatorios se encuentran situados en distintas placas, lo que hace posible, a través de las observaciones realizadas en estos, el poder determinar sus movimientos relativos. Uno de los modelos más recientes es el llamado modelo de placas cinemático NNR-NUVEL1A, el cual data de 1994.

Por otro lado, desde la década de los setenta se han venido utilizando los métodos citados anteriormente para medir deformaciones en la corteza. Desde que se pone en órbita en 1976 el satélite LAGEOS (Laser Geodynamic Satellite) a 5900 km de altura con sus 426 reflectores, se han podido determinar, no sólo los movimientos entre placas, sino deformaciones internas de una misma placa.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, A.J. and Cazenave, A. (Ed.); Space Geodesy and Geodynamics. Academic Press. London. 1986.

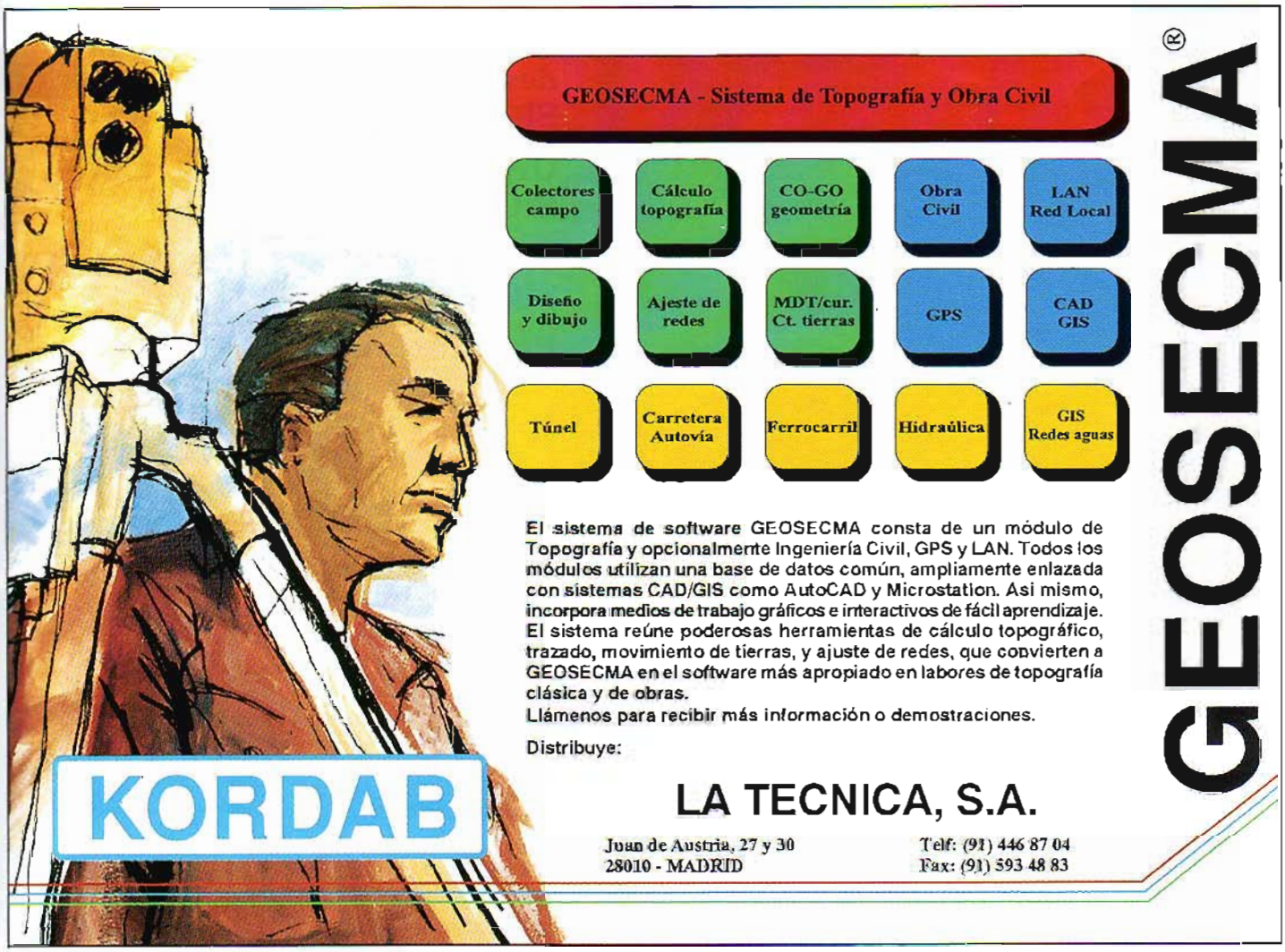
Heiskanen, W.A. y Moritz, H.; Geodesia Física. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 1985.

International Astronomical Union (Ed.); The Earths Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. Kluwer Academic Publishers. London. 1988.

International Earth Rotation Service (Ed.); 1994 IERS Annual Repport. Observatoire de Paris. Paris. 1995.

Lambeck, K.; Geophysical Geodesy. The Slow Deformations of the Earth. Oxford Science Publications. Oxford. 1988.

Lerch, F.J., *et al.*; A Geopotential Model from Satellite Tracking, Altimeter, and Surface Gravity Data: GEM-T3. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. B2, pp. 2815-2839, February 10, 1994.

Moritz, H.; Advanced Physical Geodesy. Herbert Wichmann Verlag GmbH. Karlsruhe. 1989.

Seever, G.; Satellite Geodesy. Foundations, Methods and Applications. Walter de Gruyter. New York. 1993.