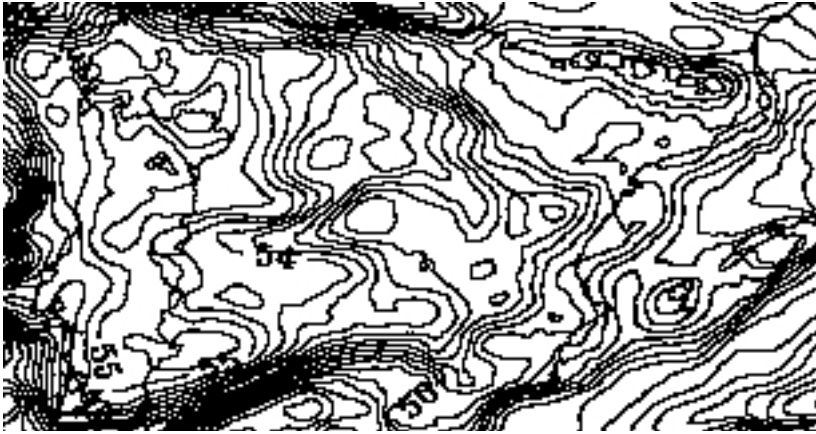


Necesidad del geoide en el posicionamiento con GPS



Abstract

The common use of global positioning systems, and specially GPS, in work like survey, cartography, photogrammetry, LIDAR... make it necessary have a geoid model to transform ellipsoidal to orthometric heights used in engineering. Because of the lack of parallelism between both reference systems not to have these models can produce important errors since the variation can take values of 10cm/Km or more in some areas, for example in the SW of Spain. If we do not consider this difference in the elaboration of DTM used to design substructure can happen that in gravity canalization the water does not arrive at the wanted point.

1. Introducción

En el campo de la geodesia el empleo de modelos de geoide ha sido algo habitual debido a que todas las observaciones, tanto lineales como angulares, realizadas para el establecimiento de las redes geodésicas que constituyen el marco de referencia en cualquier territorio deben reducirse a un elipsoide de referencia, siendo necesario para ello conocer las ondulaciones del geoide y las desviaciones de la vertical.

La aparición de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) permite obtener coordenadas tridimensionales de un punto referida al sistema de referencia geocéntrico WGS84, por lo tanto y antes de emplear las coordenadas obtenidas empleando los receptores GPS será necesario realizar una doble transformación por un lado pasar las coordenadas geodésicas WGS84 al elipsoide de referencia oficial en el lugar donde se este trabajando, aunque cada vez en más países se está adoptando el WGS84 co-

mo sistema de referencia. En la Península Ibérica el sistema de referencia para la cartografía oficial es el elipsoide de Hayford, Dátum ED-50, mientras que para las Islas Canarias es el WGS84. Para realizar esta transformación se debe disponer de los parámetros adecuados puesto que el empleo de unos datos generales puede producir errores de aproximadamente 1m en algunas zonas.

Por otro lado se debe realizar un cambio para la tercera coordenada, ya que la coordenada elipsoidal no es empleada prácticamente en ninguna de las aplicaciones de ingeniería, navegación, geodinámica.... Puesto que se trata de un magnitud que tiene sentido geométrico pero no tiene ningún sentido físico, ya que en ningún momento se tiene en cuenta la fuerza de la gravedad terrestre. Esto hace necesario que para aplicaciones de ingeniería, planificación urbanística: establecimiento de redes de suministro y evacuación,....sea necesario transformar estas cotas elipsoidales a orto-

M^a Amparo Núñez

E-mail: m.amparo.nunez@upc.edu,

Andrés Felipe Buill Pozuelo

felipe.buil@upc.edu

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

métricas, estando estas referidas a una superficie equipotencial que se conoce como geoide. El dátum vertical se establece a través del nivel medio del mar en un punto, en nuestro país el nivel medio del mar (n.m.m.) en Alicante.

La relación existente entre la altura elipsoidal h y la altura ortométrica H , viene dada a través de la ondulación del geoide N mediante la expresión 1, figura 1.

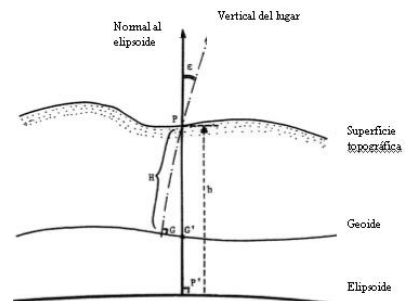


Fig. 1. Relación entre las superficies de referencia.

$$N = h - H \quad (1)$$

considerando que la desviación de la vertical, γ (ángulo formado por la normal al geode y la normal al elipsoide) es lo suficientemente pequeño para ser despreciable.

Así pues para realizar el paso entre altura elipsoidal h y la altura ortométrica H es necesario conocer la ondulación del geode en cada uno de los puntos, puesto que ambas superficies de referencia no son paralelas y la variación entre una y otra varía de una zona a otra.

2. Análisis de la situación

Durante las últimas décadas el creciente empleo de las técnicas de posicionamiento global para la determinación de las coordenadas de los diferentes puntos de la superficie terrestre, tanto en aplicaciones topográficas como de ingeniería o de cualquier tipo de representación del territorio, hace necesario el conocimiento de la superficie del geode con la precisión necesaria, en función del tipo de trabajo, para dotar de altitud ortométrica a dichos puntos, puesto que en algunas zonas la variación que experimentan las diferencias entre las altitudes elipsoidales y ortométricas puede llegar a ser de hasta 10cm/Km. (Sánchez Sobrino, J.A., 2000), (Gili et al., 2000). Esto supone que el aplicar la misma ondulación de geode en dos puntos situados a 10 kilómetros de distancia puede ocasionar un error en el desnivel entre ambos de aproximadamente 1 metro, problema que se puede presentar en algunos trabajos o lugares donde no se dispone de una malla de datos lo suficientemente densa.

La resolución de los diferentes modelos es muy variada, por ejemplo en Europa se encuentran mallas de valor medio cercano a los 2,5km en el caso del Ibergeo95, de 1,0km en el caso del UB91 y de 100m para el caso danés. En Japón este modelo (JGEOID2004) tiene un paso de cerca de 2km.

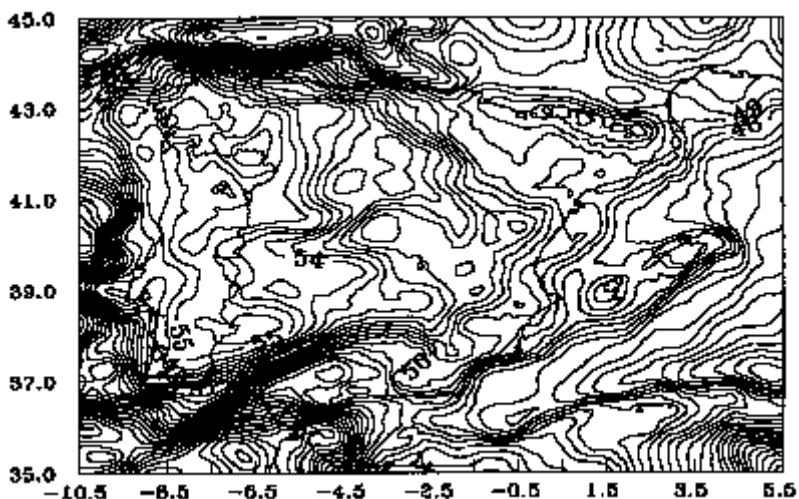


Fig. 2. Modelo Ibergeo95.

En la figura 2 podemos ver el modelo Ibergeo95 (Sevilla, 1995), en el que se representan las ondulaciones de geode en relación al elipsoide WGS84, se puede apreciar como la diferencia entre ambas superficies varía considerablemente de unas regiones a otras, localizándose el mayor gradiente en la zona SW de la Península coincidiendo con el valle del Guadalquivir.

	H (m)	h (m)
1	3,349	50,453
2	2,847	49,831
3	2,831	51,380
4	4,269	53,181

Tabla 1. Cota ortométrica y elipsoidal.

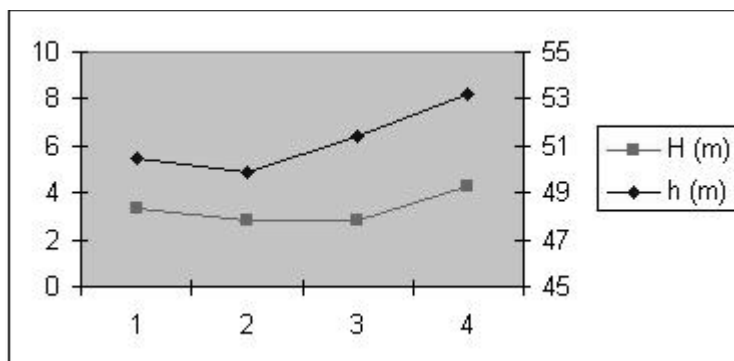


Fig. 3. Diferencias entre cota ortométrica y elipsoidal.

En la tabla 1 y figura 3 podemos ver las cotas ortométricas y elipsoidales WGS84 de diversos puntos en la zona anteriormente comentada del valle del Guadalquivir. En ella se puede apreciar claramente la falta de correlación entre la altura ortométrica y elipsoidal.

Así pues, la necesidad de disponer de un modelo de geoide de precisión ha quedado patente durante las últimas décadas en la geodesia actual, principalmente desde la generalización del uso de los sistemas de posicionamiento GPS, y últimamente en aplicaciones cinemáticas para conocer la posición de los diversos sistemas en el momento de la toma de datos (como puede ser en fotogrametría o láser escáner aerotransportado), ya que estos modelos nos permitirán pasar las cotas elipsoidales, proporcionadas por este sistema, a alturas ortométricas empleadas en las aplicaciones de ingeniería, de una forma rápida y económica, evitando tener que realizar campañas de nivelación geométrica, una de las tareas más costosa en tiempo y dinero. Así pues, la utilización completa en las actividades geodésicas pasa por tanto por disponer de un modelo geoidal que permita la determinación de altitudes ortométricas con gran rendimiento temporal y económico.

Se ha de considerar que la mayor parte de los navegadores que se emplean cada vez para todo tipo de aplicaciones, se hace de forma inadecuada en muchas de ellas, puesto que la altura que proporciona, se basa en un nivel de mar medio del que no tenemos referencia con el datum vertical de nuestro país.

3. Modelos de geoide

Podemos encontrar modelos de geoide a diferentes "escalas", desde los modelos geopotenciales, expresados mediante armónicos esféricos, a partir de los cuales se puede obtener la ondulación del geoide, a modelos continentales, regionales, locales o incluso para pequeñas zonas.

Los primeros han sido obtenidos hasta la actualidad mediante la combinación de datos terrestres y aerotransportados disponibles para toda la superficie te-

restre. Hoy en día los nuevos modelos de los que comienza a disponer se calculan a partir de las observaciones llevadas a cabo mediante las misiones gravimétricas satelitales CHAMP, GRACE y en un futuro GOCE.

4. Ajuste de modelos

Si se pretende calcular la cota elipsoidal a partir de la cota ortométrica y la ondulación de geoide obtenida a partir de un geoide gravimétrico ($h=H+N$) la obtendremos respecto a un elipsoide desconocido. Pero si la determinación de esta ondulación se realiza mediante puntos GPS/nivelación sabemos que el origen de cota elipsoidal es el elipsoide WGS84 mientras que el origen de cota ortométrica es el nivel medio del mar determinado en un mareógrafo, en nuestro caso el de Alicante, pero que es variable para cada uno de los países. Por lo tanto, existen multitud de planos de referencia origen de cotas ortométricas, y por tanto existirá una diferencia entre el geoide y la superficie de referencia de cotas ortométricas (Rapp, 1994).

El problema se plantea de igual modo a la inversa, es decir para la obtención de la cota ortométrica a partir de modelos globales, continentales o regionales, es necesario "ajustarlos" a nuestro datum vertical, puesto que este es diferente para cada uno de los países.

Para ello conociendo ambas cotas, H y h , en varios puntos podemos realizar el ajuste del modelo mediante:

Transformación de siete parámetros.

Se trata de una transformación 3D (Heiskanen et al., 1985), realizada para ajustar el datum al del sistema de referencia de los datos procedentes de satélite que se ha tomado como base en los armónicos esféricos:

$$\begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1+e & \alpha & -\beta \\ -\alpha & 1+e & \gamma \\ \beta & -\gamma & 1+e \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$$

Esta transformación será independiente de las rotaciones quedando por tanto simplificada a una transformación de 4 parámetros, que en coordenadas geográficas quedaría del siguiente modo:

$$N_{directa} = N_{modelo} + \Delta X \cos \varphi \cos \lambda + \Delta Y \cos \varphi \sin \lambda + \Delta Z \sin \varphi + R e$$

Regresión polinómica

El método de ajuste recomendable a una zona local es una regresión polinómica que en su caso más simple se transforma en una regresión plana; así, para el caso de ajuste a un plano, la fórmula a utilizar es (Jiang et al. 1996)(Núñez et al. 2002):

$$N_{directa} = N_{modelo} + a_1(\varphi - \varphi_0) + a_2 \cos \varphi_0(\lambda - \lambda_0) + a_3$$

Donde a_1 , a_2 , a_3 son los coeficientes a determinar en el ajuste mínimo cuadrático y (φ_0, λ_0) son valores medios de la latitud y longitud de la zona de ajuste, con lo que, idealmente, estamos aplicando sobre este punto giros en los dos ejes coordenados, (uno en la dirección S-N y otro en la dirección W-E) y un desplazamiento constante sobre la vertical que llevarán la ondulación modelo a la ondulación ajustada.

5. Geoides zonales

Una de las mejores opciones si estamos trabajando en zonas de reducidas dimensiones, es la obtención de un geoide para dicha área de forma geométrica, para ello es necesario conocer en varios puntos la cota elipsoidal y ortométrica y obtener la ondulación de geoides en los mismos.

Una vez conocida la magnitud de N en varios puntos se busca mediante el ajuste por mínimos cuadrados la superficie que se adapte adecuadamente, generalmente se opta por:

$$N = aX + bY + c$$

$$N = aX + bY + cXY + d$$

$$N = aX + bY + cX^2 + dY^2$$

Respondiendo la primera de las expresiones anteriores a la ecuación del plano, ajuste más sencillo ya que se supone la pendiente de la superficie constante. El resto responden a superficies alabeadas que permiten un mejor ajuste a los datos GPS/nivelación.

Tras el ajuste se analizan los residuos, estimador de la desviación típica del observable de peso unidad... mediante los test estadísticos de (F , F-Snedecor, redundancias y fiabilidad interna y externa, para determinar posibles puntos erróneos y así eliminarlos del ajuste. De este modo también podemos determinar que tipo de superficie es la que mejor ajusta.

Una vez tenemos el "modelo" lo podemos ajustar al resto de puntos del interior de la zona. Dada las variaciones de la ondulación del geoides es importante no extrapolar fuera de la zona de los puntos que hemos empleado para el cálculo para evitar errores.

6. Conclusiones

El uso de los sistemas de posicionamiento global GPS para el posicionamiento tridimensional hace necesario el empleo de modelos de geoides que permitan transformar las cotas elipsoidales a ortométricas, incluso en zonas de pequeñas dimensiones debido a que la falta de paralelismo entre ambas superficies de referencia, elipsoide y geoides, no permite utilizar una ondulación media para la zona.

Si no se dispone de dicho modelo el empleo de un único valor de ondulación de geoides puede provocar errores muy importantes, puesto que en ocasiones, y para el territorio español, el gradiente puede llegar a ser de 10cm/Km. y por lo tanto causar graves problemas en inge-

nería, principalmente cuando estamos hablando de establecer conducciones de agua, alcantarillado...

Referencias

- Gili J. A., C. Puig, F. Buill, N. Lantada, R. López, S. González (2000). "Estimación de un modelo de geoides local para navegación y posicionamiento GPS de precisión en la marisma de Doñana". IV Semana de Geomática "Cartografía y Navegación" Sitges. Abril 2000, pp. 325-335.
- Gili J. A., Ibáñez E., Solís J., Puig C., Buill F., López R., Lantada N., Núñez A., Corral I. de, González S. (2001) "Experiences using real time kinematic GPS positioning for erosion and hydrographic surveys in Doñana national park (Spain)" V Global Navigation Satellite System (GNSS) International Symposium. Sevilla, España, 2001
- Heiskanen W.A., Moritz H. (1985). "Geodesia Física". Instituto Geográfico Nacional. Instituto de Astronomía y Geodesia. Madrid.
- Jiang Z., Duquenne H. (1996). "On the combined adjustment of a gravimetrically determined geoid and GPS leveling stations". Journal of Geodesy nº 70, pp 505-514.
- Núñez Andrés A., Gili Ripoll J. A., Martín Furones A. E (2001) "Geoid adjustment in Doñana national park (Spain)" 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Niza, Francia, 2002
- Rapp (1994). "Terrain effects in geoid computations" International School for the determination and use of the geoid, Milan, October 10-15, 1994.
- Sánchez Sobrino J.A (1999). "Determinación del geoides de las Islas Canarias mediante GPS y nivelación". 2ª asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica.