Métodos astrogeodésicos como control de geoides gravimétricos

José A. Peláez [1]
Antonio J. Gil [2]
Juana Álvarez [1]
Dolores López [1]
Eduardo Núñez [3]
Álvaro Rodríguez [1]
Gracia Rodríguez [4]

[1] *Departamento de Física. Universidad de Jaén.*
[2] *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén.*
[3] *Instituto Geográfico Nacional.*
[4] *Sección Departamental de Astronomía y Geodesia. Universidad Complutense de Madrid.*

INTRODUCCIÓN

El coste y el esfuerzo necesario en las observaciones astronómicas de precisión, hicieron que a finales de la década de los setenta empezara a abandonarse el método astrogeodésico de cálculo del geoide. El realizar determinaciones astronómicas de la desviación de la vertical requería instrumentación delicada, un gran coste en tiempo y mano de obra, y personal bien entrenado. Aún así, con esta metodología se evaluó el primer geoide para la Península Ibérica en la década de los ochenta (Núñez, 1983; Núñez et al., 1988).

Las medidas astrogeodésicas pasaron de ser fundamentales en el establecimiento de redes trigonométricas de primer orden y en la evaluación de los primeros geoides, a quedar casi totalmente relegadas al mundo académico. El principal motivo fue el desarrollo que experimentaron las técnicas geodésicas espaciales (GPS, SLR o VLBI). El posicionamiento geodésico desplazó al posicionamiento astronómico, la misión natural que le correspondía a la Astronomía Geodésica.

En los últimos años, y con bastante ímpetu, se está observando un cierto resurgir de esta metodología. Las modernas cámaras cenitales digitales automáticas, integrando tecnología CCD y GPS, han solventado buena parte de los primitivos inconvenientes. Mediante la tecnología CCD se permite una automatización del proceso de medida que no podía implementarse en las cámaras cenitales no digitales. Mediante GPS, no sólo se sitúa el punto de observación, sino que además nos proporciona determinaciones precisas del instante de exposición. Hoy en día es posible adquirir equipos que nos permiten realizar de ocho a diez determinaciones de la desviación de la vertical por noche con precisiones del orden de 0.1" a 0.2" (figura 1).

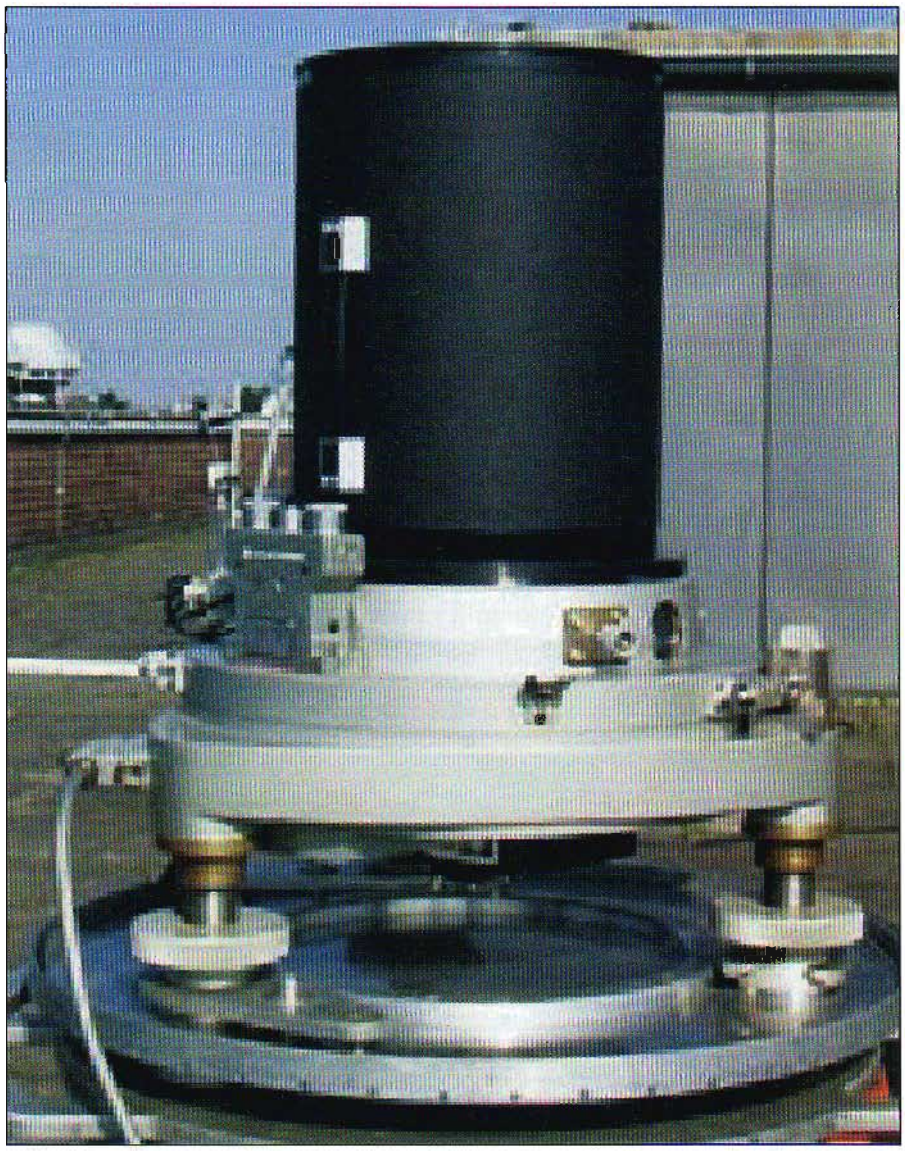

Figura 1. Cámara cenital TZK2-D (Transportable Zenith Camera 2 - Digital) desarrollada en la Universidad de Hannover.

En la realización de geoides de alta precisión evaluados en los últimos años (Kühtreiber, 1999; Abd-Elmotaal y Kühtreiber, 2000) se han integrado datos astrogeodésicos de desviación de la vertical. Se han demostrado casi indispensables a la hora de obtener geoides centimétricos en áreas montañosas, en donde, la eliminación del efecto que introduce la topografía no es inmediata, y la compleja geología es difícil de modelar. Pueden utilizarse como control de los geoides gravimétricos calculados previamente, o participando en soluciones combinadas utilizando colocación mínimo cuadrática.

Entre las ventajas que presentan los "astrogeoides", y la integración de datos astrogeodésicos en geoides gravimétricos, se encuentra el hecho de que necesitan mucha menos densidad de medidas que en el caso de los gravimétricos, que no presentan efectos de borde, por lo que pueden sumarse soluciones locales para generar un geoide regional, y que están menos influenciados por variaciones laterales de densidad del terreno. No hay que olvidar que el conocimiento de la geología local es uno de los factores más importantes que limitan la precisión de los actuales geoides.

En los últimos años, en la Universidad de Jaén estamos desarrollando la línea de investigación de control de geoides gravimétricos locales y regionales mediante la realización de perfiles GPS y astrogeodésicos. La falta de instrumentación adecuada hace que tengamos que restringirnos a lo que se da en llamar la Astrogeodesia clásica, es decir, la determinación precisa (de primer orden) de coordenadas astronómicas y desviaciones de la vertical mediante la utilización de astrolabios o teodolitos astronómicos. En nuestro caso hemos utilizado un teodolito astronómico tipo DKM 3-A de la casa Kern™ (figura 2). Las precisiones que se pueden

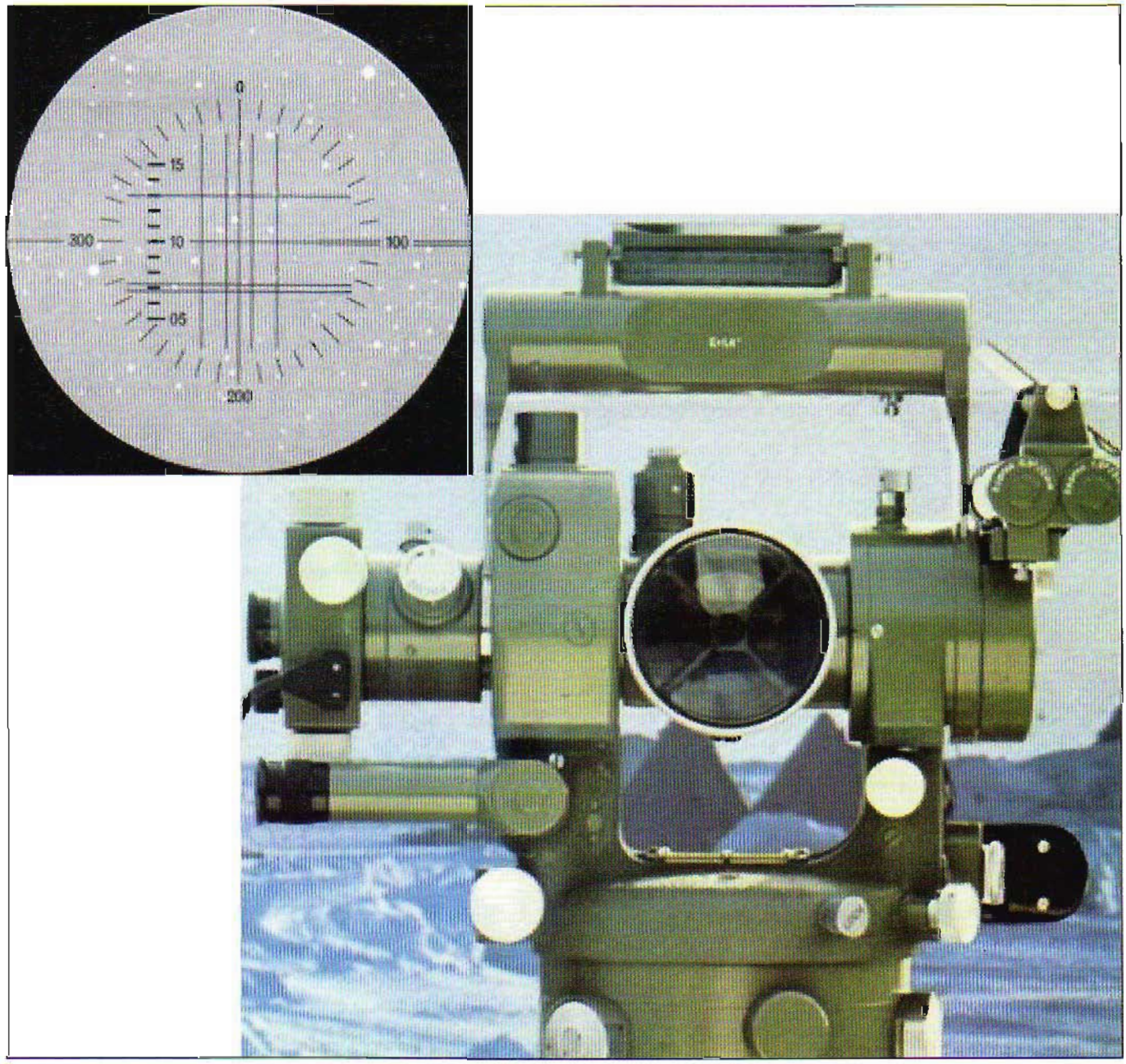

Figura 2. Teodolito astronómico DKM 3-A de Kern™.

conseguir son casi comparables a las obtenidas con las modernas cámaras cenitales digitales. Por el contrario, los tiempos de ejecución y cálculo son significativamente superiores. La mayor parte de los inconvenientes de este tipo de observaciones, citados al principio de este artículo, no lo son tanto para una institución que, junto con la investigación, tiene como principal objetivo la formación.

MÉTODO Y OBSERVACIÓN

El método más utilizado en la determinación de perfiles de geoide astrogeodésico ha sido el método de Helmert de nivelación astrogeodésica. Utilizando la llamada aproximación lineal de Helmert (Heiskanen y Moritz, 1967) es posible conocer diferencias de ondulación de geoide astrogeodésico a lo largo de un perfil realizando determinaciones astronómicas en diferentes puntos de la desviación de la vertical, y midiendo los incrementos de distancia entre puntos consecutivos. Si se realizan perfiles norte-sur o este-oeste, las expresiones y el método de observación se simplifican.

Un estudio detallado de la metodología y de los errores del método puede verse, por ejemplo, en los trabajos de Núñez (1988) y Sevilla y Núñez (1990).

Aquí presentamos los resultados obtenidos en dos perfiles, aproximadamente norte-sur, realizados en la provincia de Jaén (figura 3). Su elección ha venido motivada por el hecho de la existencia de un importante gradiente en las ondulaciones del geoide en esta zona y en esta dirección; llega a ser del orden de unos 3 m (diferencia de ondulación) en sólo 80 km (longitud del perfil). El primer perfil, con longitud media 3°36'W, y longitud total aproximada de 82.4 km, comienza en el vértice Piedra Romera (3°34'29.14"W, 37°40'56.87"N) y termina en el vértice Malabrigo (3°33'05.23"W, 38°24'34.58"N). El segundo perfil, con longitud media 3°19'W, y con longitud total aproximada de 81.5 km, comienza en el vértice Morrón (3°22'15.93"W, 37°40'35.40"N) y termina en el vértice Descuernavacas (3°16'05.26"W, 38°24'20.75"N).

El conocimiento de la desviación de la vertical parte del hecho de medir las coordenadas astronómicas de cada punto, ya que las geodésicas de los vértices son conocidas. La metodología de observación es la común utilizada en Astronomía Geodésica (Müller, 1973). Además de un sistema de adquisición de tiempo, es necesario realizar medidas de temperatura y presión para corregir de refracción atmosférica. Fenómenos como el movimiento del polo o curvatura de la plomada no pueden obviarse en determinaciones de este tipo, es decir,

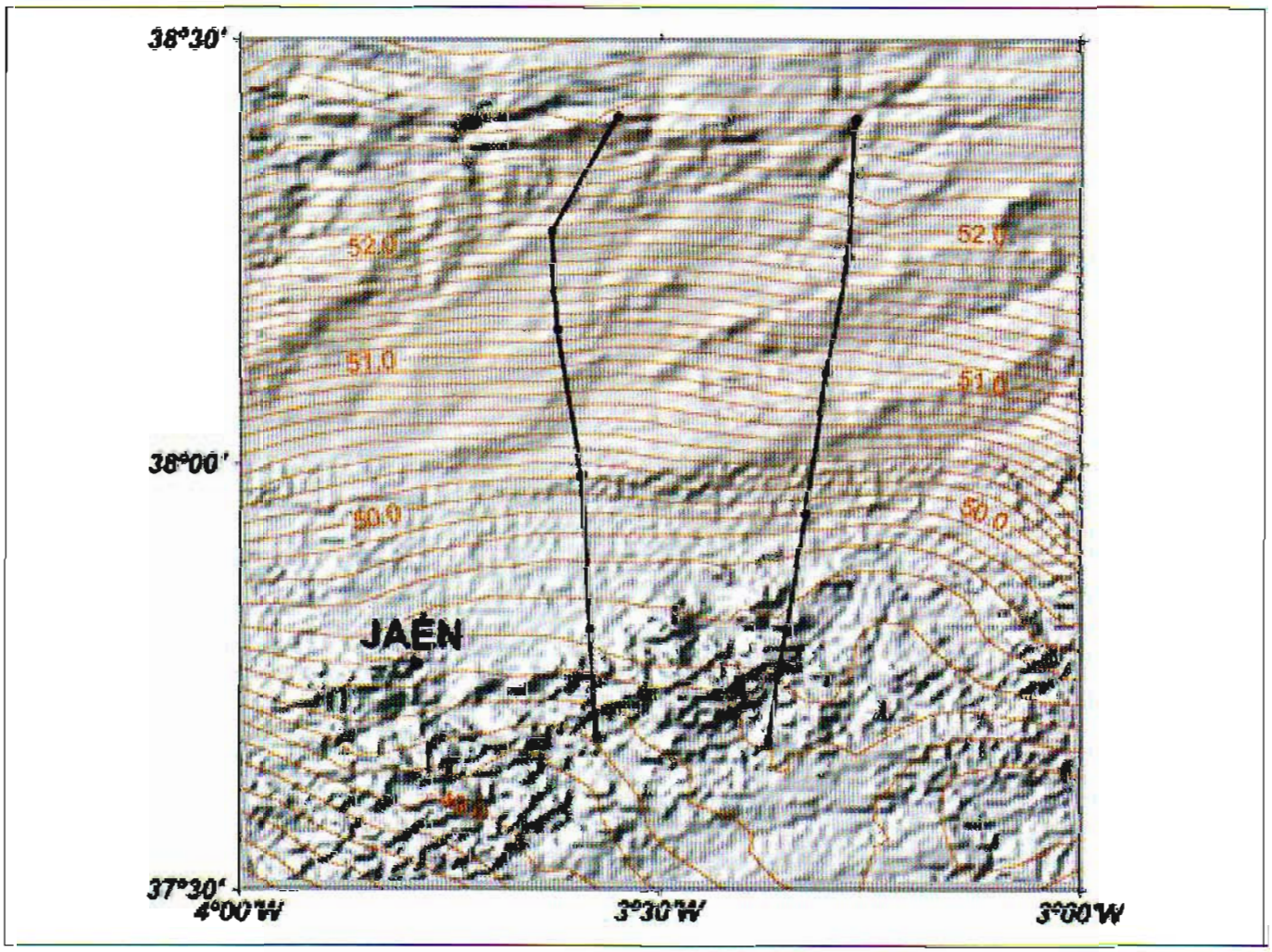

Figura 3. Perfiles astrogeodésicos presentados. Se muestra como referencia el geoide IBERGEO95 (Sevilla, 1995).

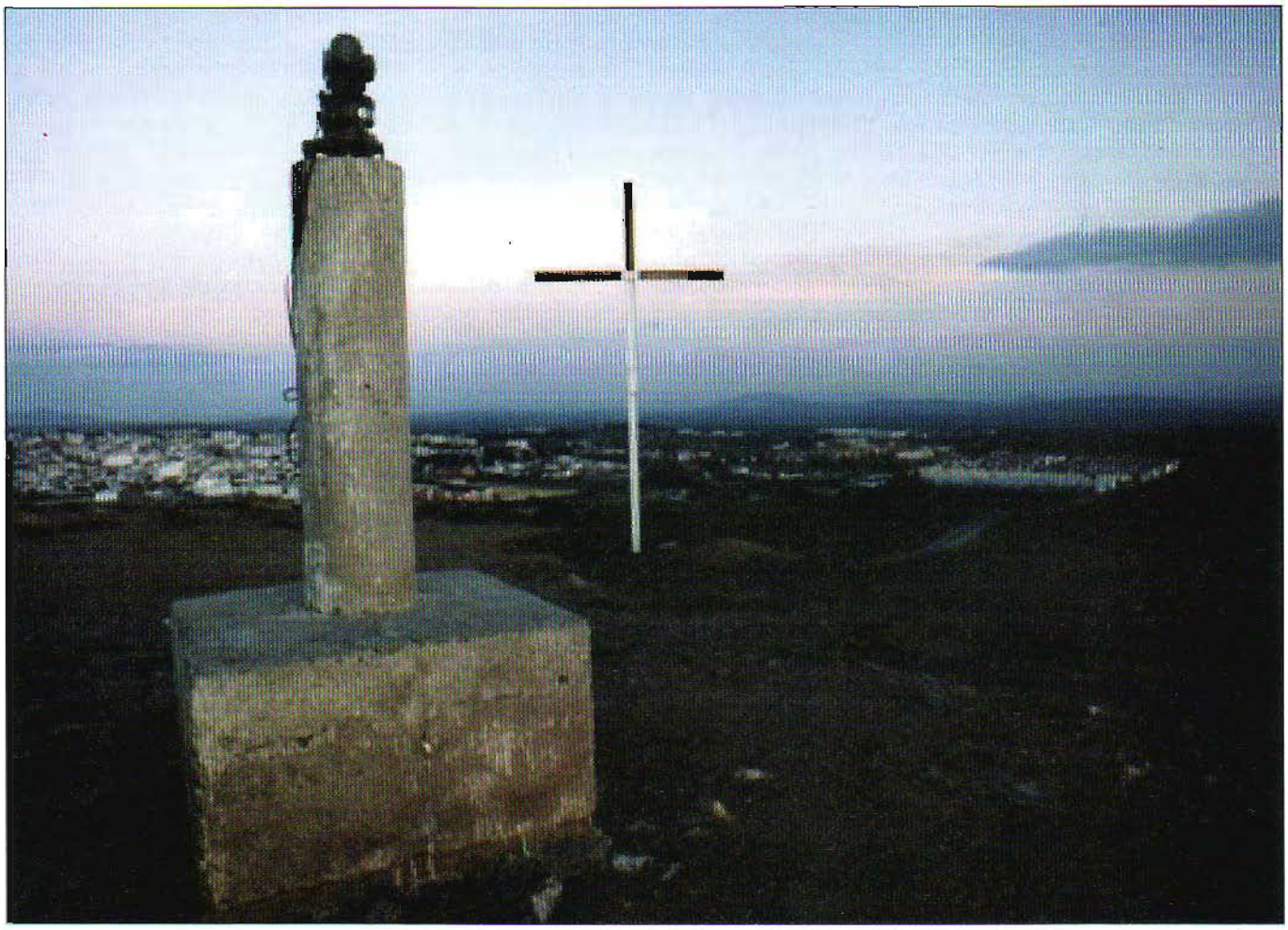

Figura 4. Vértice geodésico (Cerro de la Cruz) utilizado en uno de los perfiles.

determinaciones astronómicas de primer orden.

Como ejemplos de resultados, el máximo valor obtenido para la componente norte-sur de la desviación relativa de la vertical (_), en el primer perfil, se obtuvo en el vértice geodésico Cerro de la Cruz (3°37'47.71"W, 38°16'27.84"N) (figura 4). El resultado fue -15.9±0.2" en el sistema de referencia geodésico ED 50, y -11.5±0.2" en el GRS 80. En el segundo perfil, el máximo valor de esta componente se obtuvo en el vértice geodésico Rivera (3°16'37.60"W, 38°14'40.90"N). El resultado fue -14.9±0.2" en el sistema de referencia geodésico ED 50, y -10.5±0.2" en el GRS 80.

Como resultado final se obtuvieron las diferencias totales de ondulación del geoide y sus errores asociados a lo largo de los dos perfiles realizados: 2.46±0.33 m para el primero y 2.96±0.17 m para el segundo, ambas en el sistema de referencia geodésico GRS 80. La comparación posterior de estos resultados con los datos de ondulación de geoide obtenidos en geoides locales (Lacy et al., 2001) y regionales para la zona, muestra claramente, como era de esperar, una mayor concordancia de los perfiles efectuados con los resultados obtenidos en geoides locales (figura 5). Mientras que las diferencias entre los resultados de los perfiles astrogeodésicos y el geoide JaenGeoid2001 (Lacy et al., 2001) fueron de 32 y 2 cm, respectivamente, para los dos perfiles realizados, las diferencias con el geoide IBERGEO95 (Sevilla, 1995) fueron de hasta 106 y 23 cm, respectivamente.

Otra comprobación del resultado consiste en realizar observaciones GPS en los extremos de los perfiles. Con las diferencias de cota elipsoidal medidas y las diferencias de cota ortométrica proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional es posible conocer también las diferencias de ondulación del Geoide. En nuestro caso, los resultados fueron dispares, ya que los vértices elegidos pertenecen a la ROI y no a señales NAP, lo que representa mucha mayor incertidumbre de las cotas ortométricas de estos vértices.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Las técnicas astrogeodésicas de cálculo de geoide y/o de perfiles de geoide, relegadas durante más de dos décadas al ámbito académico, vuelven a aparecer en mayor o menor medida. No sólo se están mostrando como una destacable metodología a la hora de realizar controles de geoides gravimétricos, junto con nivelaciones GPS, sino que se están también utilizando en soluciones combinadas.

En primer lugar, se necesitan muchos menos "astropuntos" que medidas de la gravedad a la hora de evaluar un geoide. Estimaciones realizadas como paso previo a la realización de nuevo geoide austriaco indican que un proyecto de geoide de 1000 km2 requiere

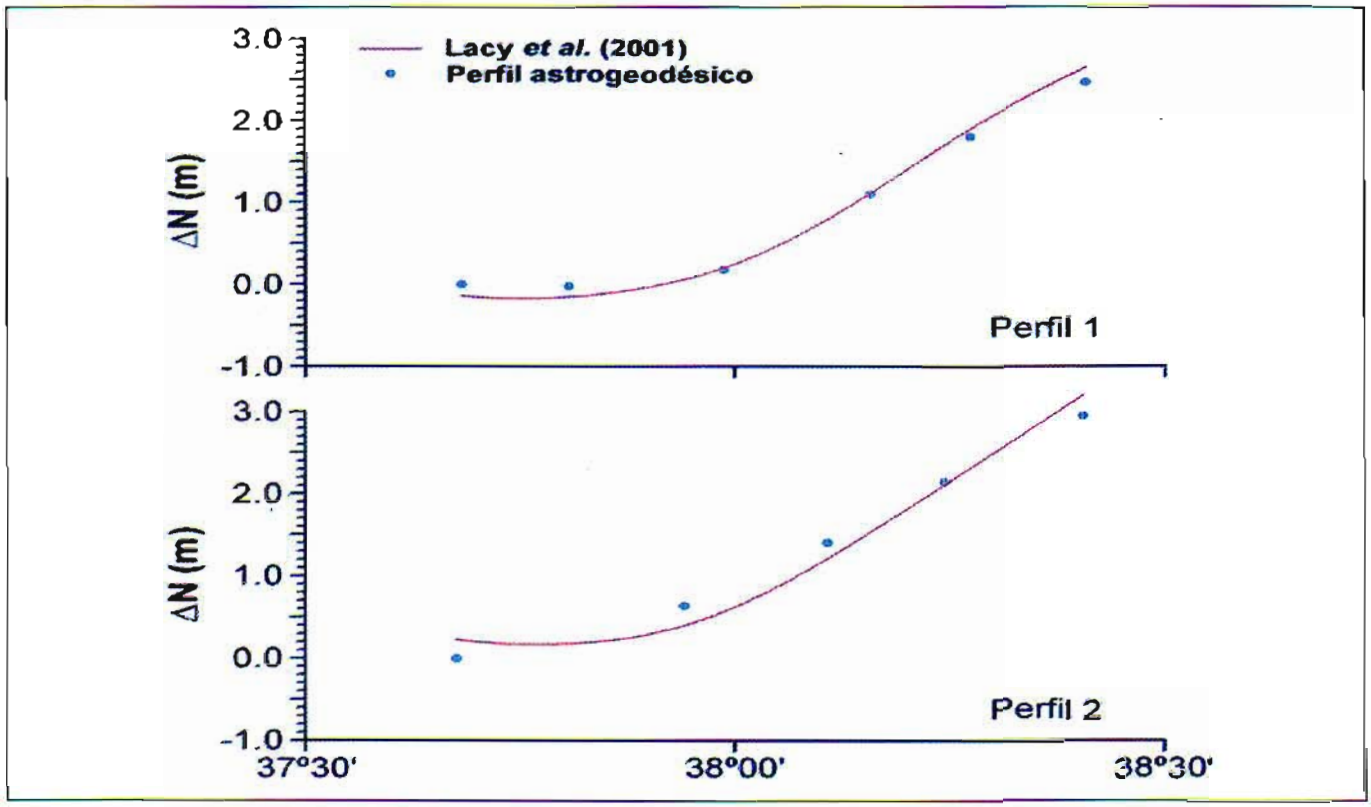

Figura 5. Comparación entre los perfiles astrogeodésicos y el geoide JaenGeoid2000 (Lacy et al., 2001).

de 500 a 1000 puntos gravimétricos para alcanzar una precisión de 2 cm, sin embargo, esta precisión se alcanza con sólo 30 determinaciones de la desviación de la vertical (Gerstbach, 1996).

Tampoco es necesario, a diferencia de los geoides gravimétricos, realizar nivelaciones ni disponer de detallados modelos digitales del terreno. Mientras que se necesitan cotas centimétricas para reducir con suficiente precisión los valores de la gravedad y obtener la anomalía de la gravedad, basta con conocer la cota del astropunto con un error del orden de 5 m.

Además, los astrogeoides y las determinaciones de la desviación de la vertical, están mucho menos influenciados que las medidas de la gravedad por la geología local. La anisotropía de los sedimentos en una cuenca puede llegar a afectar en más de 20 mGal, sin embargo, su influencia en las medidas de la desviación de la vertical no es superior a 1 ó 2".

Un dato significativo es que en las soluciones combinadas de geoide en donde se incluyen astropuntos y puntos gravimétricos, a los primeros se les hace contribuir con mucho más peso; del orden de 30 veces más en regiones alpinas y del orden de 20 veces más en regiones de topografía suave.

El principal problema que se presenta es el disponer de la instrumentación adecuada, hoy en día restringida a contadas instituciones científicas. En cualquier caso, esto también puede servir como acicate a la colaboración interinstitucional e internacional.

REFERENCIAS

Abd-Elmotaal, H. and Kühtreiber, N. (2000). Astrogeodetic geoid determination using seismic moho information. *IGeS* **11**, 81-92.

Gerstbach, G. (1996). How to get an European centimeter geoid ("astro-geological geoid"). *Phys. Chem. Earth* **21**, 343-346.

Heiskanen, W.A. and Moritz, H. (1967). Physical geodesy. W.H. *Freeman and Company.* San Francisco.

Kühtreiber, N. (1999). Combining gravity anomalies and deflections of the vertical for a precise Austrian geoid. *Boll. Geof. Teor. Appl.* **40**, 545-553.

Lacy, M.C., Rodríguez, G., Marín, E., Ruiz, A., Borque, M.J., Gil, A.J. and Biagi, L. (2001). A gravimetric geoid computation and comparison with GPS results in northern Andalusia (Spain). *Stud. Geophys. Geod.* **45**, 55-66.

Müller, H. (1973). Astronomical position, time and azimuth determinations with the Kern DKM 3-A. *Ed. Kern & Co. Ltd.* Aarau.

Núñez, A. (1983). Determinación del geoide astrogeodésico en la Península ibérica. *V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica.* Madrid.

Núñez, A. (1988). Determinación de perfiles del geoide. Optimización de métodos y aplicación a la red astrogeodésica de Portugal. *Tesis Doctoral.* Univ. Complutense de Madrid.

Núñez, A., Sevilla, M.J. y Agria, J.M. (1988). Determinación del geoide en Portugal y su influencia en la red geodésica de primer orden. *VI Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica.* Madrid.

Sevilla, M.J. y Núñez, A. (1990). Ajuste y análisis estadístico de ondulaciones del geoide obtenidas por métodos astrogeodésicos. *Física de la Tierra* **2**, 55-86.

Sevilla, M.J. (1995). A new gravimetric geoid in the Iberian Peninsula. *IGeS* **4**, 163-180.