

# Ajuste de la Red Geodésica de España (ROI) en ETRS89

**J.A. Sánchez Sobrino, M.A. Cano, L. Revuelta, R. Quirós**

Centro de Observaciones Geodésicas - Instituto Geográfico Nacional

## **RESUMEN**

*La adopción de ETRS89 como nuevo Sistema Geodésico de Referencia oficial en España implica el conocimiento de las coordenadas de todos los vértices de la Red Geodésica (ROI) en dicho sistema, así como altitudes elipsoidales. La red REGENTE, observada íntegramente con GPS y finalizada en 2001, constituye la base geodésica nacional sobre la que tienen que apoyarse todos los trabajos geodésicos, cartográficos y topográficos, con una densidad de casi 1100 puntos en la península y Baleares. Para dotar de coordenadas ETRS89 al resto de los vértices geodésicos de la ROI (casi 10.000 vértices más) se ha llevado a cabo un ajuste conjunto de toda la red con observaciones geodésicas clásicas (y observaciones GPS en algunas regiones) sobre el marco de REGENTE. En este artículo se muestran las estrategias de procesamiento así como los resultados y precisiones obtenidas. El listado de coordenadas puede consultarse en el servidor FTP del Centro de Observaciones Geodésicas: <ftp://ftp.geodesia.ign.es>.*

## **ABSTRACT**

*The adoption of ETRS89 as new Geodetic Reference System in Spain implies the knowledge of coordinates of all the points of the Geodetic Network (ROI) in this system as well as ellipsoidal heights. The REGENTE network, completely observed with GPS and finished in 2001 constitutes the framework on which all geodetic, cartographic and topographic works have to be supported, with a density of almost 1100 points in the peninsula and Balearic Islands. In order to obtain coordinates of the rest of the network (almost 10.000 additional points) an adjustment of the whole network have been made with classical observations (and GPS observations in some regions) under the REGENTE framework. In this article the strategies for processing are explained as well as obtained results and precisions. The coordinates set can be obtained in the Centro de Observaciones Geodésicas FTP server: <ftp://ftp.geodesia.ign.es>.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

El 29 de agosto de 2007 fue publicado el Real Decreto 1071/2007 por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. La adopción de ETRS89 como futuro Sistema Geodésico de Referencia oficial en España traerá cambios importantes en todos los trabajos geodésicos y cartográficos que se lleven a cabo. La Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE) constituye la base sobre la que dichos trabajos deben apoyarse. La densidad de esta red de clase C es de un vértice geodésico cada hoja del Mapa Topográfico Nacional 1/50.000, con un total de más de 1100 vértices en todo el país (una densidad media de uno por cada 450 km<sup>2</sup>).

Las características y condicionantes generales que cumple esta red (buena accesibilidad, horizonte despejado, mecanismo de centrado forzado para el estacionamiento, etc) hacen que la densidad de la red sea suficiente como apoyo para cualquier trabajo geodésico y topográfico en una determinada zona. Se trata de una red de clase C con precisión nominal absoluta mejor que 5 cm, si bien la precisión relativa entre vértices está en torno a 1 - 2 cm. Como densificación de esta red se puede considerar la Red Geodésica Nacional de Orden Inferior (ROI) y por tanto es necesario dotarla de coordenadas en el nuevo sistema ETRS89. La ROI está constituida por casi 11.000 vértices geodésicos en península y Baleares (densidad de un vértice por cada 45 km<sup>2</sup>) con coordenadas en el sistema ED50 y una precisión media de 0,2 m en planimetría y 0,3 m en altimetría. Esta red fue observada mayoritariamente durante los años 80 y 90 mediante triangulación y el método de vuelta de horizonte, realizando compensaciones parciales por provincias a medida que los trabajos de observación iban avanzando. El marco sobre el que se apoyaba ROI-ED50 era

la Red Geodésica de Primer Orden, con observaciones clásicas de lados de 30-40 km y por tanto con precisión muy inferior a la que se puede obtener actualmente con GPS.

Se ha llevado a cabo un recálculo de toda la ROI en el sistema ETRS89 (excepto Canarias, cuya geodesia ya disponía de coordenadas en el sistema REGCAN95), fijando los vértices REGENTE e incluyendo observaciones angulares clásicas y GPS (ésto último en aquellas áreas en las que se han hecho observación GPS).

En Cataluña, el Instituto Cartográfico de Cataluña llevó a cabo una campaña de observación GPS en la mayoría de los vértices ROI. También en Navarra, todos los vértices ROI han sido observados con GPS por el Gobierno de Navarra (Dir. Gral. de Obras Públicas), así como en Baleares por SITIBSA. El Instituto Cartográfico de Valencia (ICV) también observó una parte de la ROI con GPS durante la densificación de la red geodésica en la Comunidad de Valencia. Todos estos organismos han aportado los datos GPS en sus regiones para llevar a cabo una compensación global mezclando con observables clásicos de ROI. Otras campañas GPS observadas por el IGN en las regiones de Murcia, Madrid y de una forma más dispersa en Castilla-León han sido añadidas a esta compensación global.

## 2. METODOLOGÍA.

### 2.1. Depuración de las observaciones clásicas de ROI.

Antes de la introducción en cálculo de las observaciones se llevó a cabo una exhaustiva depuración de las mismas que permita detectar y corregir errores groseros o de transcripción. El ajuste contiene casi 100.000 observaciones angulares acimutales, 67.000 observaciones cenitales y más de 6.000 vectores GPS.

#### 2.1.1. Observaciones acimutales.

La depuración de las vueltas de horizonte acimutales consistió en:

- Revisión exhaustiva de libretas de campo originales y comprobación con fichero digital (codificación, transcripción, cambio de situación de vértices, medias de series de vuelta de horizonte, etc.).
- Transformación de direcciones angulares a acimutes (con coordenadas ETRS89 aproximadas de ROI).
- Cálculo de la desorientación en la estación con todas las visuales.
- Depuración de visuales erróneas no detectadas anteriormente en un determinado rango a partir de diferencias en la desorientación de la vuelta de horizonte.

#### 2.1.2. Observaciones cenitales.

- Revisión de libretas de campo originales y comprobación con fichero digital.
- Reducción de la visual por alturas de instrumento, pilar y mira.
- Reducción del ángulo por índice de refracción general (0,13).
- Reducción del ángulo por índice de refracción calculado con visuales recíprocas.
- Detección de errores mediante cálculo del índice de refracción con visuales recíprocas.
- Detección de errores por alturas de instrumento/mira por comparación de alturas de pilar procedentes de base de datos.
- Reducción del ángulo cenital por desviación de la vertical en función de las componentes  $\xi$  y  $\eta$  y del acimut  $\alpha$ , ya que se calculan altitudes elipsoidales y no ortométricas:

$$\varepsilon = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha$$

Aunque el valor de la desviación de la vertical no se puede considerar despreciable (alcanza hasta 10" en la zona pirenaica), se comprobó que con las observaciones cenitales, el ajuste altimétrico empeoraba introduciendo las correcciones procedentes del modelo de geoide IBERGEO95 (escalado con observaciones de REGENTE). Por ello, en el ajuste final no se introdujeron las correcciones.

La reducción por refracción se hizo aplicando un índice genérico (0,13) para todas las observaciones, sirviendo el calculado por visuales recíprocas para la detección de posibles errores cuando hubiera un índice de refracción calculado con un valor muy alejado de un margen "normal" (entre 0.05 y 0.20).

## 2.2. Ajuste independiente de observaciones.

Una vez depuradas las observaciones clásicas se procedió a realizar un ajuste independiente por bloques de cada grupo de observaciones (GPS, acimutales y cenitales) con una doble finalidad:

- Detectar observaciones erróneas no detectadas en pasos anteriores (por exceder el valor crítico del residuo tipificado).
- Establecer una ponderación adecuada de los tres tipos de observaciones independientemente, para que posteriormente en una compensación conjunta el peso sea adecuado.

En el caso de las observaciones cenitales, la varianza a priori para cada una de las observaciones se estableció en función de la distancia de la visual según la fórmula empírica:

$$\sigma = (1 + D (km))^{0.6}$$

La varianza resultante para introducir como peso en las observaciones angulares acimutales fue  $6^{\text{cc}}$ , mientras que en las observaciones cenitales, aunque con pequeñas discrepancias, se comprobó que la fórmula anteriormente reseñada resultaba idónea. Las visuales cenitales de más de 12 km fueron eliminadas.

El total de las observaciones rechazadas tanto a priori como posteriormente en la fase de ajuste fue de casi el 1%.

El software utilizado para el ajuste fue Microsearch Geolab 2001, de BitWise Ideas Inc.

## 2.3. Ajuste conjunto (GPS y observaciones angulares).

Finalmente, con los pesos obtenidos en los ajustes independientes anteriores, se realizó una compensación conjunta, detectando posibles inconsistencias entre ambas observaciones no detectadas en pasos anteriores y por lo tanto, realizando un último filtrado de observaciones rechazadas en función del valor del residuo crítico (según el test Tau máximo).

Para considerar el gran volumen de datos del ajuste realizado se han de tener en cuenta las siguientes estadísticas:

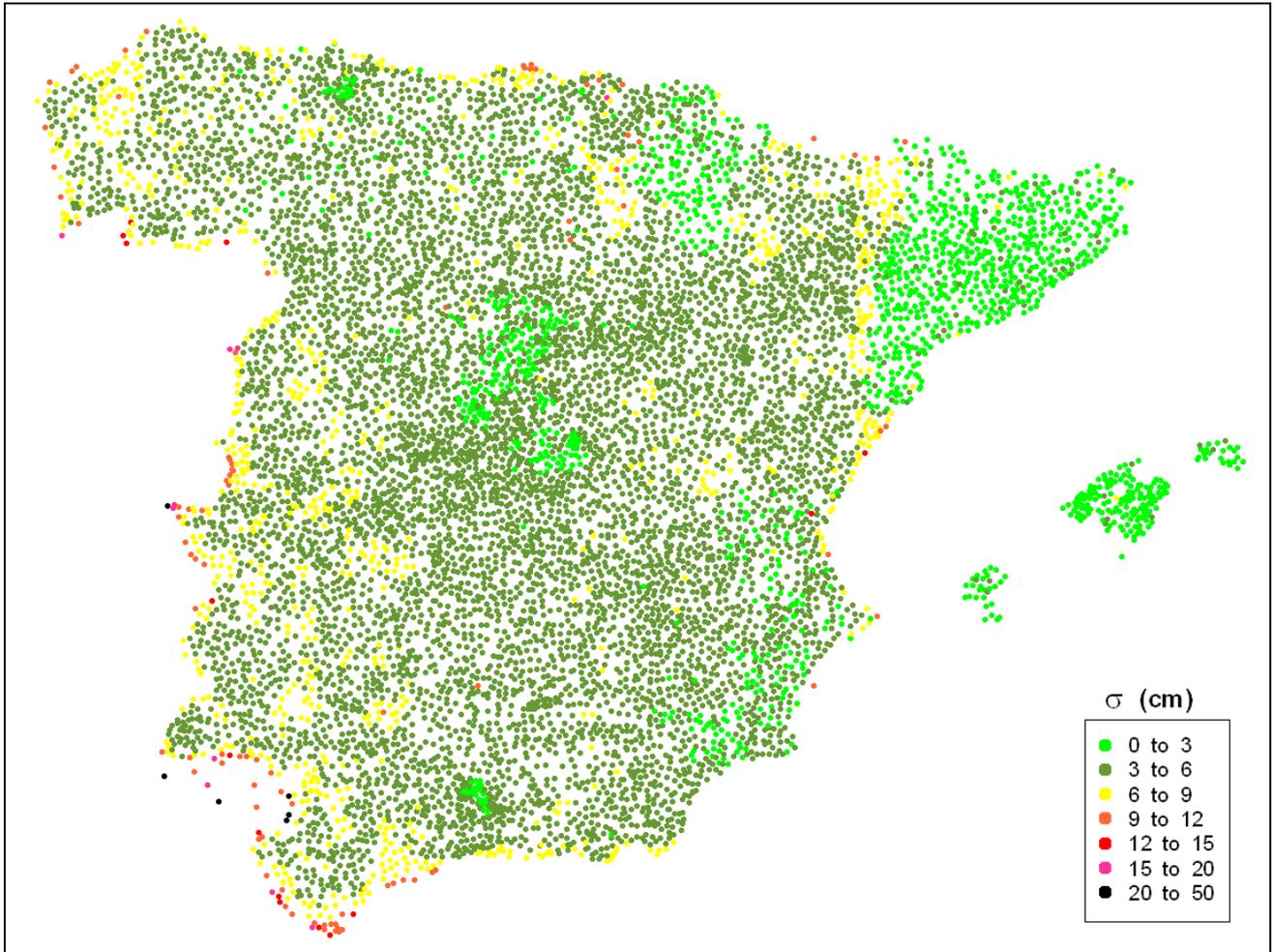
- Número de vértices del ajuste: 11.019
- Vértices fijos (REGENTE): 1.071
- Vértices con observación clásica y GPS: 1.207
- Direcciones acimutales: 99.698
- Direcciones cenitales: 66.644
- Vectores GPS: 6.401
- Observaciones totales: 185.545 (GPS \* 3)
- Parámetros: 41.985 (coordenadas + desorientaciones)
- Grados de libertad del ajuste: 143.560

## 3. ESTADÍSTICAS Y RESULTADOS.

Del ajuste final se obtuvieron coordenadas (geográficas y UTM en el huso correspondiente) así como desviaciones estándar y elipses de error (95% de confianza) para todos los vértices de la red calculados. Esta última información (parámetros de fiabilidad de las coordenadas de cada vértice geodésico) se suministrará junto a las coordenadas, ya que es un dato que puede ser muy útil al usuario que está apoyándose en la red geodésica según el tipo de trabajo y la precisión requerida para el mismo.

Evidentemente, en las zonas en las que se han combinado observaciones clásicas con GPS, la precisión resulta superior a las zonas en las que sólo hay observaciones clásicas. Asimismo la precisión resultante es bastante desigual en vértices de observación clásica según el número de visuales que contenga su vuelta de horizonte, geometría de la misma, longitud de las visuales, etc.

En las figuras 1 y 2 se puede ver por zonas las desviaciones estándar resultantes ( en planimetría y altimetría respectivamente):



*Fig. 1. Desviaciones estándar (planimetría).*

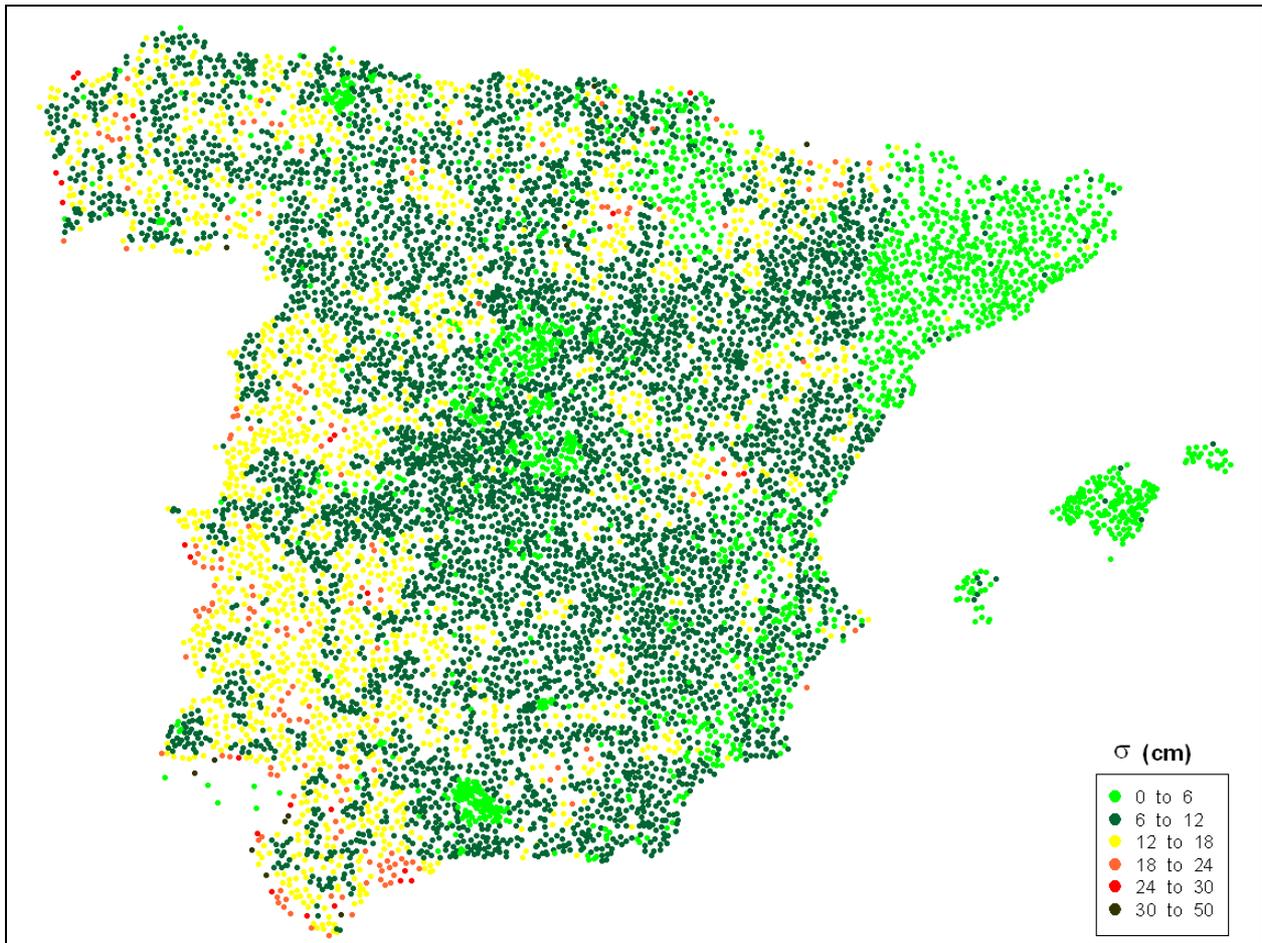


Fig. 2. Desviaciones estándar (altimetría).

Como se puede ver en las figuras 3 y 4, las desviaciones estándar en los vértices con observación clásica presentan un valor medio de 4,9 cm en planimetría y 9,8 cm en altimetría, estando en planimetría el 89% de los vértices con una desviación inferior a 6 cm y en altimetría el 94% por debajo de los 15 cm.

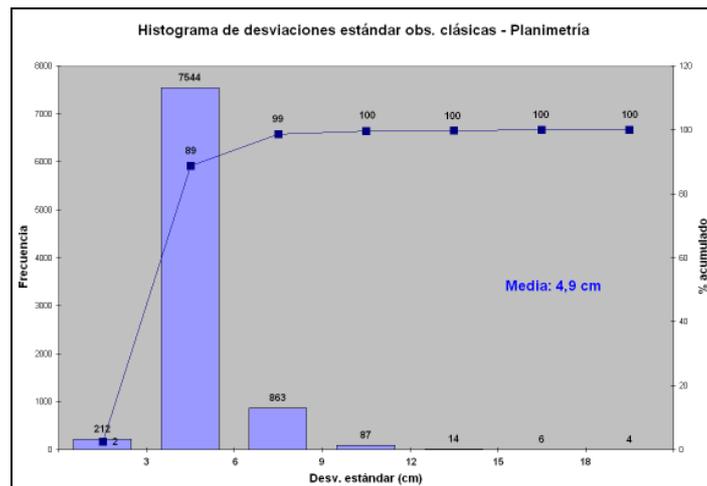


Fig. 3. Histograma de desviaciones estándar en planimetría (vértices sólo con observaciones clásicas).

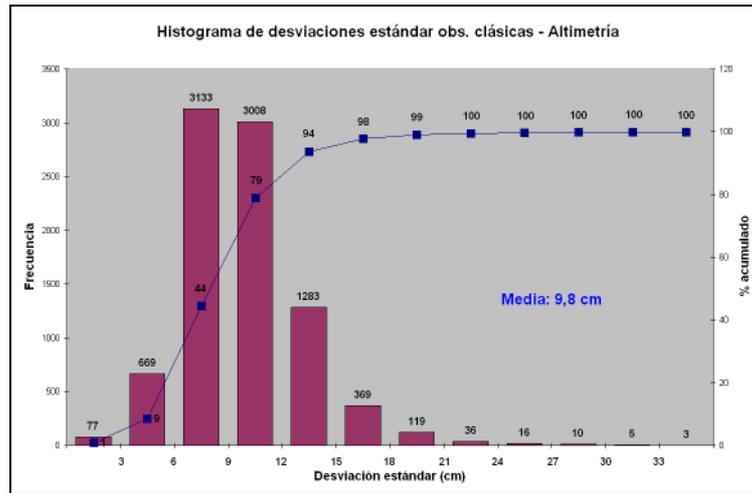


Fig. 4. Histograma de desviaciones estándar en altimetría (vértices sólo con observaciones clásicas).

En el caso de vértices con observación GPS, como se puede ver en las figuras 5 y 6, los resultados son significativamente mejores, estando las elipses de error (95% de confianza) en un valor medio de 1,4 cm en planimetría y 2,7 cm en altimetría.

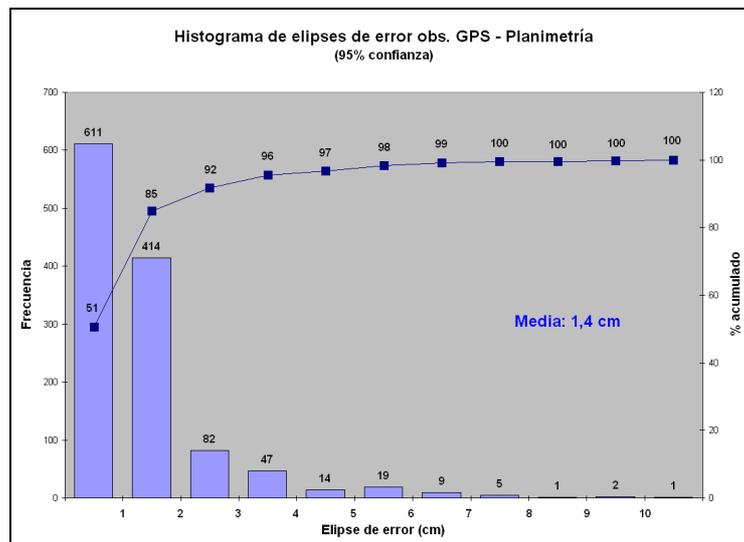


Fig. 5. Histograma de elipses de error en planimetría (vértices con observaciones GPS).

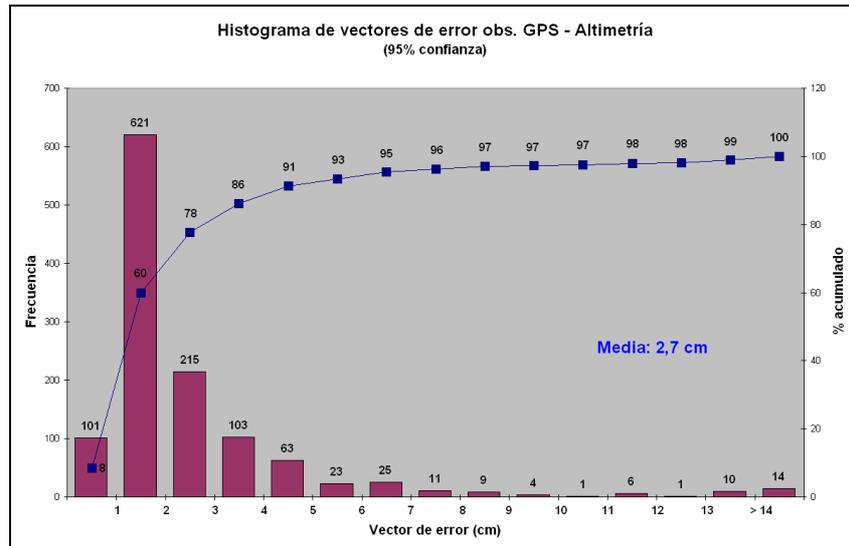


Fig. 6. Histograma de elipses de error en altimetría (vértices con observaciones GPS).

Finalmente, con los resultados obtenidos se ha llevado a cabo una comparación con las coordenadas ETRS89 de ROI transformadas por el algoritmo MCS Grid, herramienta utilizada para el paso de toda la cartografía nacional de ED50 a ETRS89.

Como se puede ver en la figura 7, casi el 80% de los vértices tienen una discrepancia inferior a 0,1 m, con un valor medio de 8 cm de discrepancia en distancia planimétrica.

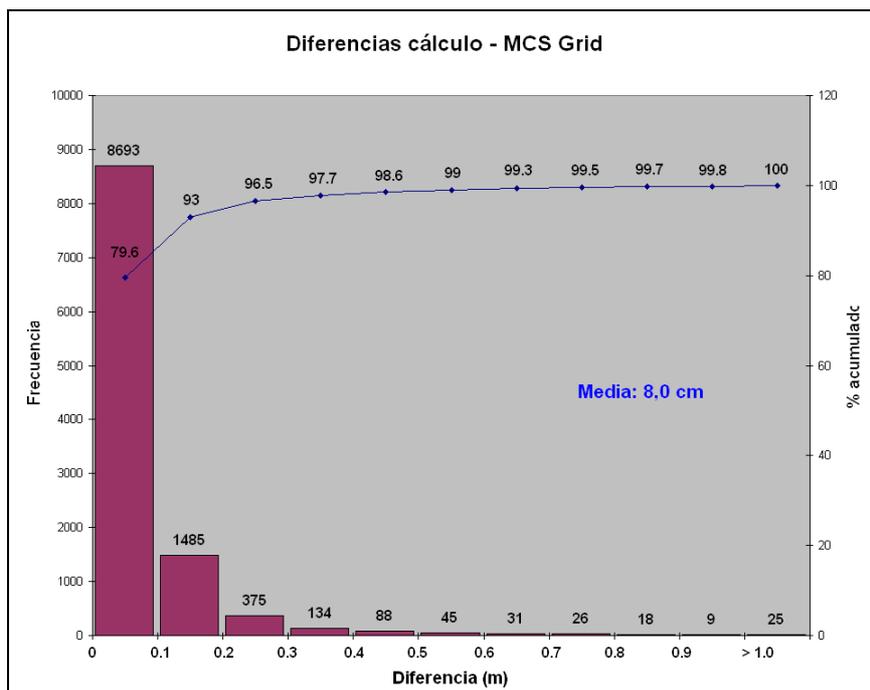


Fig. 7. Diferencias cálculo ROI ETRS89 - MCS Grid.

Esta comparación de forma gráfica (figura 8) resulta muy útil para detectar posibles inconsistencias zonales de ROI ED50, ya que el algoritmo resulta bastante uniforme y por tanto las diferencias grandes deben ser achacadas a defectos en las coordenadas ED50, sobre todo procedentes de la estrategia de cálculo utilizada en los años 80 (especialmente constreñimientos a red de primer orden y provincias limítrofes calculadas con anterioridad). También nos permite chequear la precisión del algoritmo MCS Grid, que como se puede observar, prescindiendo de anomalías en ED50, prácticamente en toda España tiene una precisión mejor que 0,2 m y en la mayoría de los casos, mejor que 0,1 m.

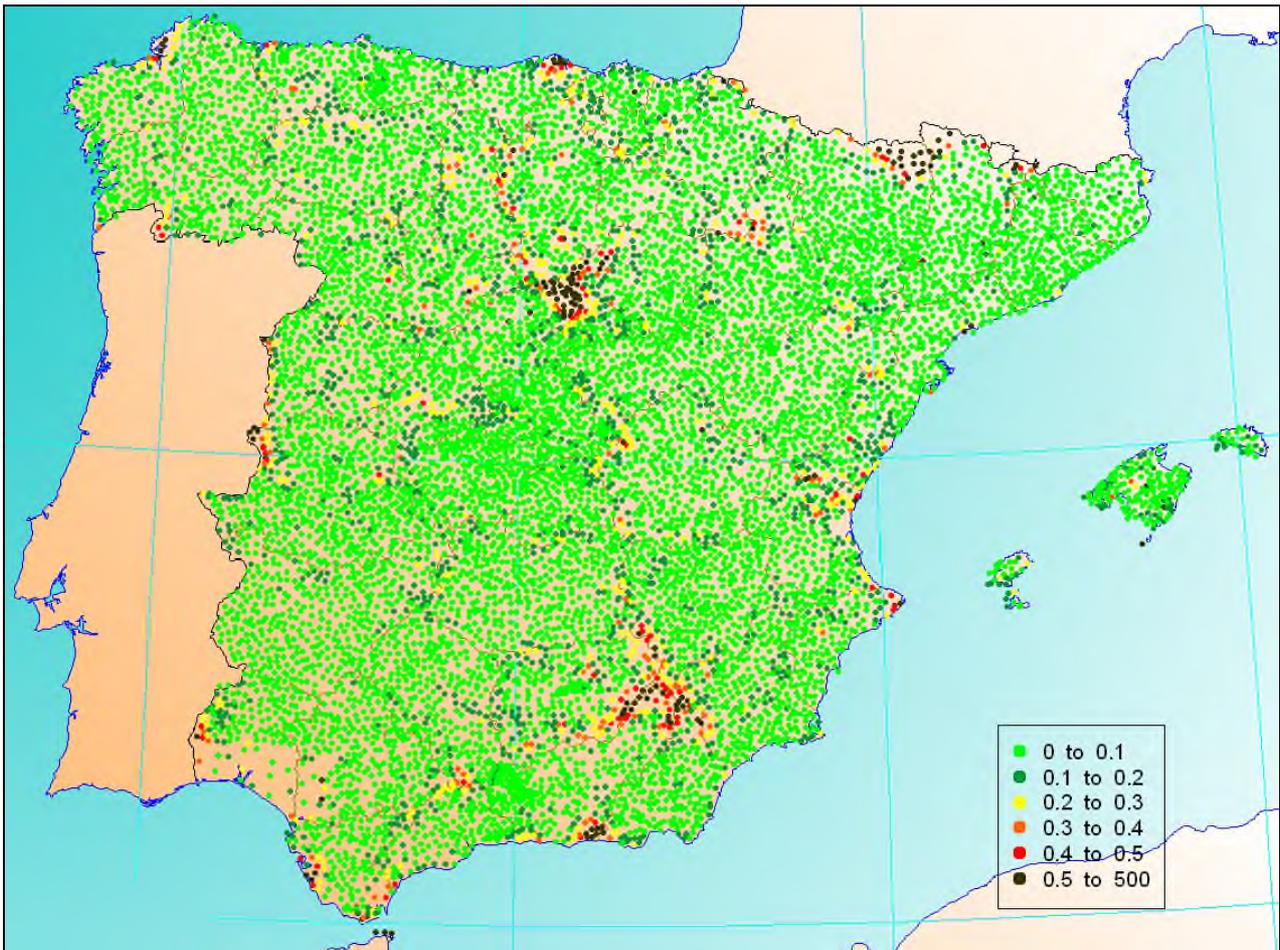


Fig. 8. Diferencias cálculo ROI ETRS89 - MCS Grid.

#### 4. CONCLUSIONES.

Se ha realizado el nuevo ajuste de la Red Geodésica de España en ETRS89 constreñiendo a la red REGENTE con observaciones clásicas angulares e incluyendo observaciones GPS adicionales, obteniendo una precisión final mejor que 0,08 m en planimetría y mejor que 0,15 m en altimetría (altitudes elipsoidales). En los más de 1.200 vértices geodésicos en los que se han incluido observaciones GPS los resultados han sido notablemente mejores.

Según el Real Decreto 1071/2007 REGENTE constituye el marco de referencia oficial para cualquier trabajo futuro en ETRS89, pero el usuario podrá apoyarse también sobre la densificación de este marco, que lo constituye el resto de la red ROI, teniendo además conocimiento de la precisión teórica que tiene cada vértice geodésico de la red, ya que en el listado de coordenadas aparece la desviación estándar del ajuste (siempre respecto a REGENTE).

El ajuste de ROI se ha realizado con altitudes elipsoidales constreñidas a REGENTE. Si bien toda la red dispone de altitudes ortométricas, queda pendiente realizar un nuevo ajuste con altitudes ortométricas, si bien el constreñimiento del mismo ha de realizarse sobre vértices enlace de REGENTE con la nueva Red Española de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP).

Es posible que en el futuro se vayan incorporando nuevas observaciones GPS sobre vértices de la ROI, de tal manera que podrán ir apareciendo nuevas versiones de coordenadas que mejoren la precisión actual.

En el servidor FTP del Centro de Observaciones Geodésicas <ftp://ftp.geodesia.ign.es> se pueden consultar los resultados de este cálculo en coordenadas geográficas y UTM. Hay que recalcar que la altura elipsoidal se da en vértices REGENTE a la parte de arriba del pilar (centrado forzado, CF), ya que así queda referenciada con total precisión, mientras que en el resto de vértices ROI la altura elipsoidal, al igual que la ortométrica, está referida a base de pilar

(BP). En breve se actualizará también de este juego de coordenadas en la página web del IGN (<http://www.ign.es>), así como toda la Red de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP).

## 5. AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos la colaboración a todas aquellas instituciones que han cedido datos GPS para realizar el ajuste conjunto de la red:

- Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).
- Gobierno de Navarra (Dir. Gral. de Obras Públicas).
- SITIBSA (Islas Baleares).
- Instituto Cartográfico Valenciano (ICV).

## 6. REFERENCIAS.

- Cano, M. A., Talaya, J., Termens, A., Quirós, R., Revuelta, L., Sobrino, J. A. S.: "Ajuste de la Red Geodésica de Orden Inferior R.O.I. de Cataluña en ETRS89". *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla (España). febrero 2006.
- Cano, M.A., Sánchez Sobrino, J.A., Revuelta, L., Quirós, R., González Matesanz, F.J. y Valdés, M. "Ajuste de la red geodésica de España (ROI) en ETRS89 - *Adjustment of the geodetic network of Spain (ROI) in ETRS89*". IX Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOP-CART 2008. Congreso Internacional de Ingeniería Geomática y Topográfica. Valencia, 18 - 21 de febrero de 2008.
- González-Matesanz, F. J., Dalda, A., Quirós, R., Celada, J., Sobrino, J. A. S.: "Predicción de diferencias entre ED50 y ETRS89". *4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Figueira da Foz (Portugal). 3-7 febrero 2004.
- Quirós Donate, R., Barbadillo Fernández, A., Regidor Gutiérrez, J.L, Sanz Megía, J.M., Cano Villaverde, M.A., Prieto Morín, J.F.: "El Proyecto REGENTE". *3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Valencia, 2002.