

COMPARACIÓN DE MODELOS GEOPOTENCIALES RECIENTES EN ARGENTINA

COMPARISON OF RECENT GEOPOTENTIAL MODELS IN ARGENTINA

Cornero Cecilia^(*), Pereira Ayelen, Pacino Ma. Cristina, Balparda Laura

Área de Geodinámica- Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura- Universidad Nacional de Rosario-
CONICET
Av. Pellegrini 250 – 2000 – Rosario – Argentina
E-mail: ccornero@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Los modelos geopotenciales globales recientes representan una gran mejora en muchas aplicaciones relacionadas con el modelado del campo gravitatorio. Estos modelos ofrecen una mayor precisión en la resolución del geode y del campo gravitatorio. En esta investigación son analizados y comparados en Argentina los modelos más recientes derivados de las misiones GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), GOCE (*Gravity field and Ocean Circulation Explorer*), CHAMP (*CHAllenging Mini-satellite Payload*) y LAGEOS (*LAser GEOdynamics Satellite*), tales como los EIGENs (*European Improved Gravity model for the Earth by New techniques*), junto con el último de la serie EGM (*Earth Gravitational Model*), con el objetivo de determinar cuál es el que mejor se adapta a este país. Se presentan y analizan las diferencias entre los distintos modelos y los valores de ondulación geoidal (calculados a partir de datos altimétricos de GPS y nivelación) y de anomalías de gravedad (obtenidas a través de campañas gravimétricas terrestres). El modelo satelital que mejor se adapta es aquél que presenta la menor diferencia respecto a los datos terrestres de anomalías de gravedad y ondulación. A tales fines, se adoptó un criterio de selección de modelos, considerando los que presentaron menor dispersión de los residuos y medidas estadísticas de posición central de éstos próximos a cero. No obstante, un modelo con medidas estadísticas de posición central distante de cero, pero con una muy baja dispersión podría ser seleccionado corrigiendo los datos mediante una simple transformación que permita obtener medidas de posición central próximas a cero, manteniendo una baja dispersión de los residuos. La información estadística de los residuos se resume en un gráfico de caja o *boxplot* que permite visualizar cómo los datos están distribuidos o dispersos, basado en medidas "robustas" para cada uno de los modelos. Los residuos de anomalías de gravedad de los modelos EGM 2008, EIGEN.6C3stat y EIGEN.6C2 son los que presentaron los mejores resultados estadísticos. En cambio, los residuos de los modelos EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S mostraron una mayor dispersión. Finalmente, el modelo GIF 48 se ubicó en un orden intermedio entre el primer y el segundo grupo. Un comportamiento similar se observó a partir de los residuos de ondulación geoidal. En consecuencia, los modelos que presentaron mejores resultados fueron aquellos que incluyen en su determinación información de misiones satelitales y de campañas terrestres.

Palabras clave: Modelo de Geopotencial, Argentina, GRACE, GOCE, EIGEN, EGM.

ABSTRACT

Recent Earth geopotential models represent a great improvement on several applications related to the gravity field modeling. These models offer a high precision in the resolution of the geoid and in the Earth's gravity field. In this investigation, the most recent Earth geopotential models derived from GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), GOCE (*Gravity field and Ocean Circulation Explorer*), CHAMP (*CHAllenging Mini-satellite Payload*) and LAGEOS (*LAser GEOdynamics Satellite*) missions, like EIGENs (*European Improved Gravity model for the Earth by New techniques*), together with the latest model from EGM (*Earth Gravitational Model*) series, are analyzed and compared in Argentina, aiming to know which one fits better in the country. The differences between

these models and values of geoid undulation (calculated with altimetry data provided from GPS and spirit leveling) and gravity anomalies (obtained from terrestrial gravimetric campaigns) are presented and analyzed. The satellite model that presents a better fitting is the one having the lower differences with the terrestrial data (gravity anomalies and undulation values). For that purpose, a selection model criteria was adopted, considering the ones that presented a lower residual bias and statistical measures of central tendency close to zero. The residual statistical information is summarized in a boxplot that shows how the data is distributed, based on "robust" measures for each model. The gravity anomaly residuals of the EGM 2008, EIGEN.6C3stat and EIGEN.6C2 models were the ones that presented the best statistical results. On the other hand, the residuals of the models EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 and GOCO03S showed a higher variability. Finally, the GIF 48 model can be placed between the first and second group. A similar behavior was detected for the geoid undulation residuals. In consequence, the Earth geopotential models that perform better results were those that include in their calculation data from satellite missions and terrestrial information.

Key words: Geopotential model, Argentina, GRACE, GOCE, EIGEN, EGM.

INTRODUCCIÓN

Las misiones satelitales gravimétricas lanzadas en los últimos años, tales como GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), GOCE (*Gravity field and Ocean Circulation Explorer*) y CHAMP (*CHALLENGING Mini-satellite Payload*) permiten un estudio más preciso de la componente de longitud de onda larga del campo gravitatorio terrestre. Estas misiones son el comienzo de lo que se denomina como "década internacional del geopotencial" y la comunidad científica espera un gran avance en la determinación del campo de gravedad y la circulación oceánica. Esta evolución significó la culminación en la representación del campo de gravedad global luego del lanzamiento del modelo EGM96 (Lemoine et al., 1998) que incorporó en su determinación nuevos tipos de mediciones basadas en información satelital. Varios modelos de geopotencial determinados con datos satelitales de las misiones GRACE y/o CHAMP han sido desarrollados incorporando información adicional de gravedad terrestre y altimetría satelital (Förste et al., 2006; Reigber et al., 2006; Tapley et al., 2005). En general, los modelos combinados ofrecen una resolución de entre 10 y 55 km en la representación del geode y las anomalías de gravedad.

En esta investigación fueron analizados y comparados en Argentina siete modelos de geopotencial: EGM 2008, EIGEN.6C3stat, EIGEN.6C2, GIF 48, EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S con el objetivo de determinar cuál es el que mejor se adapta al país. Se presentan y analizan las diferencias entre los distintos modelos y los valores de ondulación geoidal (calculados a partir de datos altimétricos de GPS y nivelación) y de anomalías de gravedad (obtenidas a través de campañas gravimétricas terrestres).

ÁREA DE ESTUDIO

Situada en Sudamérica, la Argentina es el segundo país más grande de esta región y el octavo en el mundo por superficie. Sus 3.800 kilómetros de longitud se extienden desde los 22° hasta los 55° de latitud Sur. El frente marítimo sobre el Océano Atlántico alcanza los 4.725 kilómetros. La gran extensión territorial de la Argentina posee una diversidad de paisajes, en los que alternan campos de hielos con zonas áridas, relieves montañosos con mesetas o llanuras, cursos fluviales o áreas lacustres con la amplitud oceánica, y vegetación esteparia con bosques y selvas. La cordillera de los Andes posee la cumbre más alta del hemisferio occidental, el Aconcagua.

INFORMACIÓN DISPONIBLE

Datos terrestres

En esta evaluación se utilizaron tres tipos de información de campo; alturas provenientes de nivelaciones clásicas, coordenadas determinadas con GPS, y mediciones de gravedad terrestre.

La precisión de los datos de ondulación geoidal (N) disponible para Argentina es heterogénea. En efecto, los valores de N calculados con el método geométrico provienen de diversas fuentes, tales como universidades, gobiernos provinciales, Instituto Geográfico Nacional (IGN), entre otros, y fueron obtenidos a lo largo del tiempo utilizando instrumental de variada precisión y vinculados a distintos marcos de referencia. Se transformaron todas las coordenadas geodésicas al marco de referencia POSGAR07. En la Figura 1 se muestra la distribución geográfica de los 1.062 puntos recolectados.

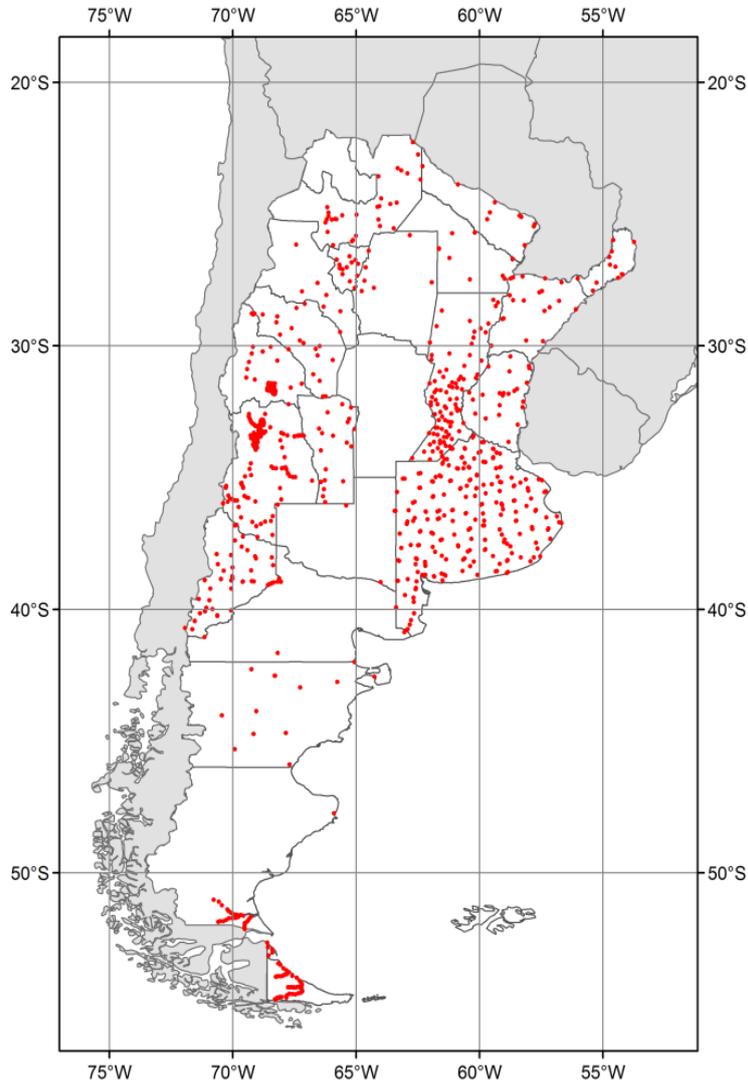


Figura 1. Distribución geográfica de los puntos de ondulación (N) recolectados.
Figure 1. Geographic distribution of collected undulations points (N).

En cuanto a la información gravimétrica disponible, se cuenta con un volumen de datos importante pero variado en calidad y distribución geográfica. Esta base de datos se conforma principalmente con unos 150.000 puntos que incluyen aquellos pertenecientes a las redes IGN de distintos órdenes y datos aportados por institutos científicos, universidades y empresas privadas (Villella y Pacino, 2010). La distribución geográfica de las estaciones gravimétricas se muestra en la Figura 2.

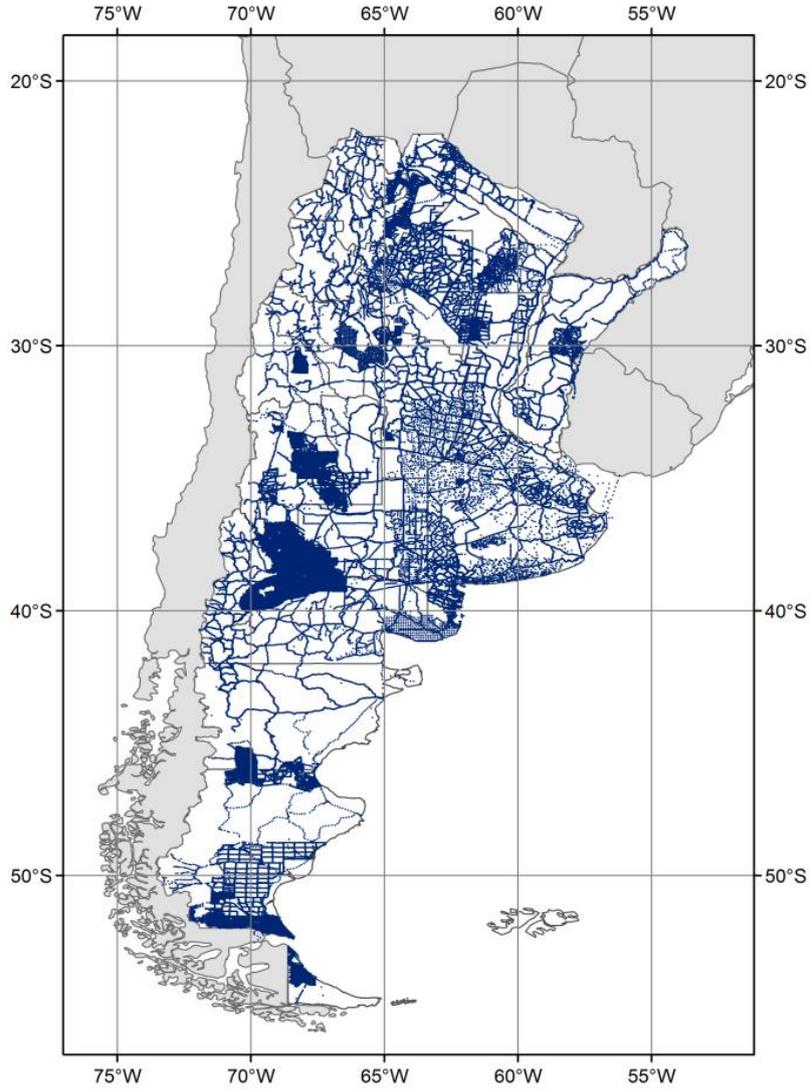


Figura 2. Distribución geográfica de las estaciones gravimétricas.
Figure 2. Geographic distribution of the gravimetric stations.

Para este trabajo se calcularon anomalías de Aire Libre en las estaciones que componen la base de acuerdo con la definición clásica (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2005):

$$AAL = Gobs + CAL - \gamma \quad (1)$$

Siendo *AAL*: anomalía de Aire Libre; *Gobs*: gravedad observada, *CAL*: Corrección de Aire Libre, γ : gravedad teórica para el elipsoide GRS80.

Donde:

$$\gamma = 978032.67714 \frac{(1+0.00193185138639 \text{ sen}^2\varphi)}{\sqrt{(1-0.00669437999013 \text{ sen}^2\varphi)}} \text{ mGal} \quad (2)$$

$$C_{AL} \cong -\frac{\partial\gamma}{\partial H} = 0.3086 H \text{ (mGal/m)} \quad (3)$$

φ latitud y H expresada en metros.

Modelos Geopotenciales

En este trabajo fueron analizados y comparados siete modelos de geopotencial para determinar cuál de ellos muestra en Argentina el mejor ajuste según parámetros estadísticos de los valores residuales entre cada uno de los modelos y los datos de campo.

Existen diferencias entre los modelos, las que se deben fundamentalmente a los datos utilizados en su cálculo. En tal sentido, se seleccionaron modelos de geopotencial basados solamente en datos satelitales y modelos combinados que incluyen información adicional como datos terrestres y/o de altimetría satelital. Esta categorización determina el máximo grado y orden de los coeficientes armónicos esféricos del desarrollo en serie del geopotencial, con resoluciones espaciales que van desde los 9 km hasta los 79 km.

Uno de los modelos considerados para este análisis es el EGM 2008 (Pavlis et al., 2008), desarrollado por la NGA -*National Geospatial-Intelligence Agency*-. Este modelo, de grado 2.190 y orden 2.159, está basado en datos satelitales de GRACE, datos de gravedad terrestre y de altimetría satelital.

Otro de los modelos analizados es el GIF 48 (Ries et al., 2011), que consiste en una combinación de datos GRACE y datos de gravedad terrestre, completo hasta grado y orden 360. Este modelo, publicado en el año 2011, fue determinado a partir de una selección de información de 66 meses dentro del periodo 2003-2011.

El modelo GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 (Pail et al., 2011) está basado en datos satelitales GOCE, completo hasta grado y orden 250. Este modelo fue publicado en el año 2013.

En tanto que el modelo GOCO03S (Mayer-Gürr et al., 2012) se establece a partir de una combinación de datos satelitales de las misiones GOCE, GRACE, CHAMP y SLR, completo hasta grado y orden 250.

Los últimos tres modelos corresponden a la serie EIGEN; uno de ellos es el EIGEN.6C2 (Förste et al., 2013a) basado en una combinación de datos satelitales (GOCE, GRACE Y LAGEOS) y datos terrestres (tres sets de datos terrestres, de los cuales dos de ellos son productos del DTU -*Danish National Space Institute*-, de máximo grado y orden 1949. El mismo fue computado en el año 2012 por el GFZ Postdam (*GeoForschungsZentrum*) y el GRGS Toulouse (*Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale*). Otro de los modelos utilizado es el EIGEN.6C3stat (Förste et al., 2013b), un modelo de gravedad combinado de alta resolución, y representa una pre-versión estática del EIGEN.6C4, que es el próximo modelo a ser lanzado por los centros GFZ y GRGS. Éste es derivado a partir de una combinación de datos satelitales (LAGEOS, GRACE, GOCE) y datos terrestres del DTU, y fue seleccionado como un modelo de referencia para el Nuevo Geoide Gravimétrico Canadiense CGG2013.

Por último, el modelo EIGEN.6S2 (Rudenko et al., 2014) está basado sólo en datos satelitales (LAGEOS, GRACE RL02, GOCE-SGG) hasta grado y orden 260.

En la tabla 1 se presentan los modelos mencionados y sus principales características.

Modelo	Grado/Orden	Datos	Resolución
EGM 2008	2190	S,G,A	5' (9 km)
GIF 48	360	S,G	30' (55 km)
GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4	250	S	43' (79 km)
GOCO03S	250	S	43' (79 km)
EIGEN.6S2	260	S	42' (77 km)
EIGEN.6C3stat	1949	S,G,A	6' (11 km)
EIGEN.6C2	1949	S,G,A	6' (11 km)

Tabla 1. Principales características de los modelos de geopotencial utilizados (S: datos satelitales, G: datos de gravedad terrestre, A: datos de altimetría).

Table 1. Main characteristics of the geopotential models used (S: satellite data, G: land gravity data, A: altimetry data).

EVALUACIÓN DE MODELOS DE GEOPOTENCIAL

Los datos de ondulación geoidal y anomalías de gravedad para cada modelo seleccionado fueron calculados a través del centro de cálculo del ICGEM -*International Centre for Global Earth Models*- (<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>).

Para cada modelo se definió una grilla con un espaciamiento de 0,25° x 0,25° de acuerdo a la región en estudio, sobre la cual se evaluaron las funciones ondulación geoidal y anomalía de gravedad utilizando un sistema de referencia compatible con POSGAR 07.

Los datos gravimétricos y altimétricos se midieron en tierra en Argentina a lo largo de 1 siglo con diferentes precisiones y tecnologías, y las alturas así determinadas no cuentan con reducciones de gravedad. Esto origina incertidumbres en los valores de anomalías gravimétricas y ondulación geoidal del mismo orden que las diferencias entre perturbación de la gravedad versus anomalía de la gravedad y ondulación versus anomalía de altura.

De acuerdo a Barthelmes (2009), la anomalía de altura¹ es calculada por el ICGEM en la superficie terrestre, aproximada en el elipsoide por la fórmula de Bruns más una corrección de primer orden. En la historia de la Geodesia, la importancia de dicha anomalía radica en que puede ser obtenida a partir de mediciones de la gravedad en la superficie terrestre sin el conocimiento de las hipótesis acerca de las densidades de masas internas, por ejemplo.

La anomalía de gravedad calculada por el ICGEM es la "clásica", que se define como la magnitud del gradiente del potencial continuado hacia abajo hasta el geode, menos la magnitud del gradiente del potencial normal en el elipsoide (Barthelmes, 2009).

En la aplicación del ICGEM, el sistema de referencia utilizado en todos los cálculos fue el WGS84. Además, se consideró el sistema libre de mareas y se tuvo en cuenta el término de orden 0 del desarrollo en serie en armónicos esféricos (relacionado con las coordenadas del centro del elipsoide y del centro de gravedad terrestre).

A continuación se procedió al cálculo de los residuos, los cuales surgen de la diferencia entre el valor ondulación/anomalía de las bases de datos utilizadas y el interpolado de la grilla de cada modelo de geopotencial.

Existen investigaciones afines con datos de Argentina, como puede mencionarse el trabajo de Pereira & Pacino, 2010 y Pacino & Tocho, 2009.

La fórmula utilizada para obtener las diferencias es:

$$Z_{res} = Z_{dat} - Z_{grd} \quad (4)$$

Donde,

Z_{res} = valor residual (de ondulación geoidal o de anomalía de gravedad)

Z_{dat} = valor Z de los datos terrestres (ondulación geoidal o anomalía de gravedad)

Z_{grd} = valor Z de la grilla en las coordenadas interpoladas de la grilla de cada modelo de geopotencial coincidentes con el Z_{dat}

RESULTADOS

En la Tabla 2 se presenta un resumen de estadísticas básicas de los residuos de anomalías de gravedad. Se puede observar que el modelo EIGEN.6C3.stat es el que presenta el promedio más cercano a cero, le siguen los modelos EGM 2008 y EIGEN.6C2 con valores muy próximos. En lo que respecta al desvío estándar, el modelo EGM 2008 posee la menor dispersión de los residuos. EIGEN.6C3.stat y EIGEN.6C2 también presentan valores mínimos de dispersión, semejantes al EGM 2008.

¹ Esta anomalía de altura es una aproximación al geode de acuerdo a la Teoría de Molodenski. Es igual al geode sobre el mar.

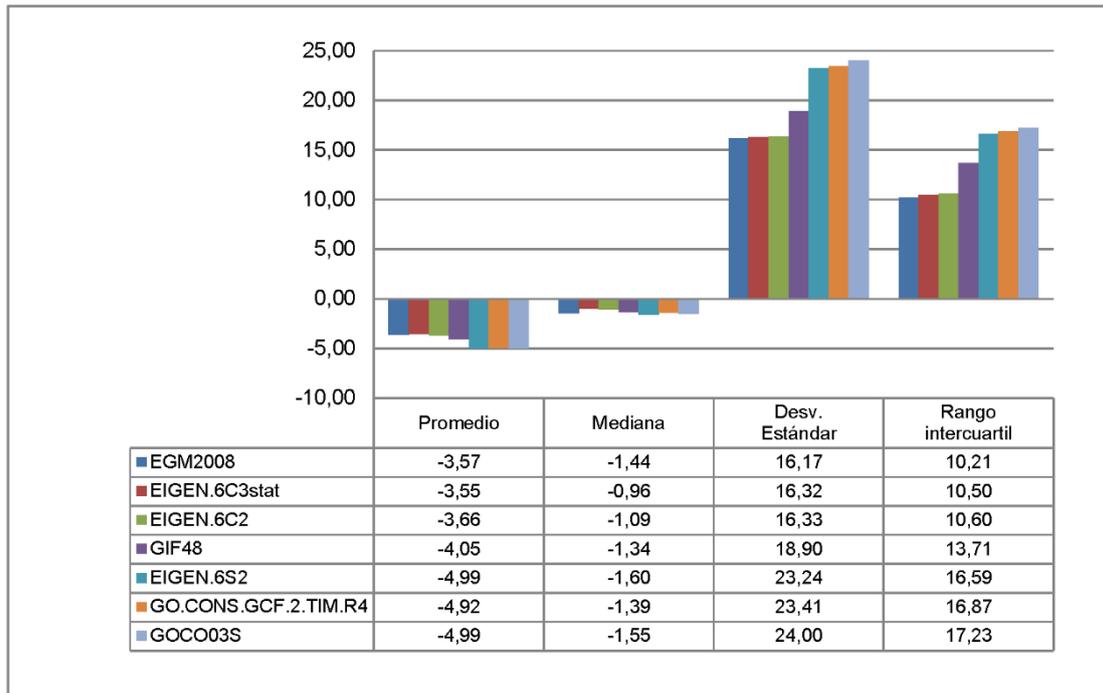


Tabla 2. Residuos de anomalías de gravedad, en mgal.
Table 2. Residues of gravity anomalies, in mgal.

De acuerdo a estos resultados, no podemos definir un único modelo como el más óptimo ya que las medidas de posición central y dispersión de los residuos presentan en algunos casos variaciones mínimas al comparar los distintos modelos.

Es por ello que se determinaron dos categorías; la Categoría I incluye los modelos que presentan el promedio de los residuos con valores próximos a ceros y el desvío estándar con la menor dispersión. En tanto que en la Categoría II se agrupan los modelos que tienen el promedio más distante de cero y mayor dispersión de los residuos.

Puntualmente, para los datos de este estudio no se observó un modelo con valores altos en las medidas de posición central (en particular el promedio) y baja dispersión de los residuos, por lo cual se concluye que no es necesario realizar una transformación previa a ninguno de los modelos.

En la Categoría I se incluyen los modelos: EGM 2008, EIGEN.6C3stat y EIGEN.6C2, mientras que la Categoría II comprende los modelos: EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S. El modelo GIF 48 puede incluirse en ambas categorías, ya que presenta valores estadísticos que se encuentran en una posición intermedia entre ambos grupos.

A partir de los resultados obtenidos de las estadísticas de los residuos de ondulación del geoide (Tabla 3), también se procedió a clasificar a los modelos en dos categorías siguiendo el mismo criterio. En la Categoría I se incluyen los modelos: EGM 2008, EIGEN.6C3stat, EIGEN.6C2 y GIF 48. En tanto que la Categoría II comprende los modelos: EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S.

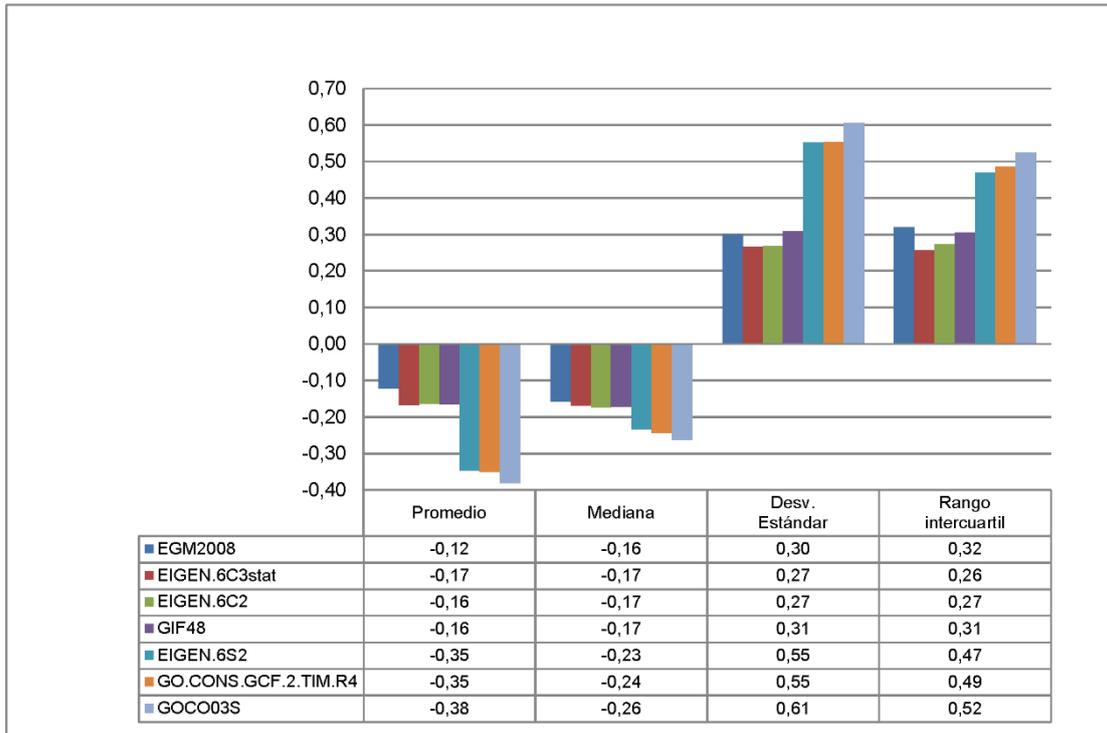


Tabla 3. Residuos de ondulación del geoide, en metros.

Table 3. Residues of the geoid undulation, in meters.

La información estadística de los residuos se resume en un gráfico de caja (o *boxplot*) que permite visualizar como los datos están distribuidos o dispersos, basado en medidas “robustas” (mediana, 1º y 3º cuartil, límite inferior y superior de las colas) para cada uno de los modelos. Los modelos que más se ajustan a los datos terrestres son aquellos que presentan la caja centrada en cero (mediana próxima a cero), más pequeña (menor rango intercuartil) y límite inferior y superior de las colas más próximas a cero.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores del rango intercuartil y la mediana para cada modelo.

Como puede observarse en la Figura 3, los residuos de anomalías de gravedad de los modelos EGM2008, EIGEN.6C3stat y EIGEN.6C2 son los que presentan los mejores resultados estadísticos. En cambio, los residuos de los modelos EIGEN.6S2, GO.CON.S.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S presentan mayor dispersión respecto de cero. El modelo GIF 48 presenta una situación intermedia.

En la Figura 4, se observa un comportamiento similar al análisis realizado a partir de los residuos de ondulación geoidal.

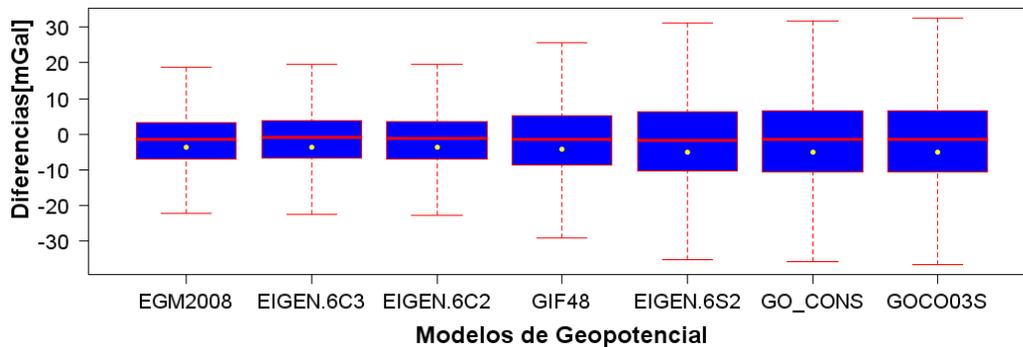


Figura 3. Gráfico de caja (*boxplot*) - Residuos de anomalías de gravedad.

Figure 3. Boxplot - Residues of gravity anomalies.

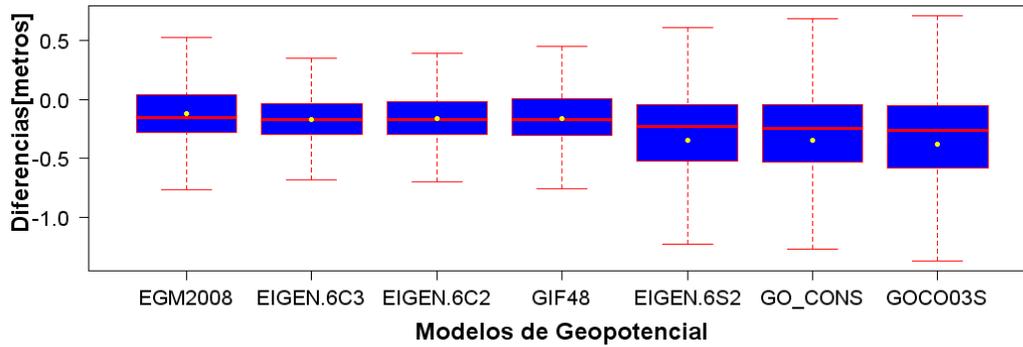


Figura 4. Gráfico de caja (*boxplot*) - Residuos de ondulación geoidal.
Figure 4. Boxplot - Residues of geoidal undulation.

Finalmente, se presentan los mapas de residuos de anomalías de gravedad para los modelos EGM 2008 y GOCO03S en Argentina, donde puede observarse que el primero ajusta mejor debido a que existe un menor número de áreas con tonalidades rojo y azul intenso, mientras que en el segundo caso aparecen con mayor frecuencia áreas con estas tonalidades. (Figura 5).

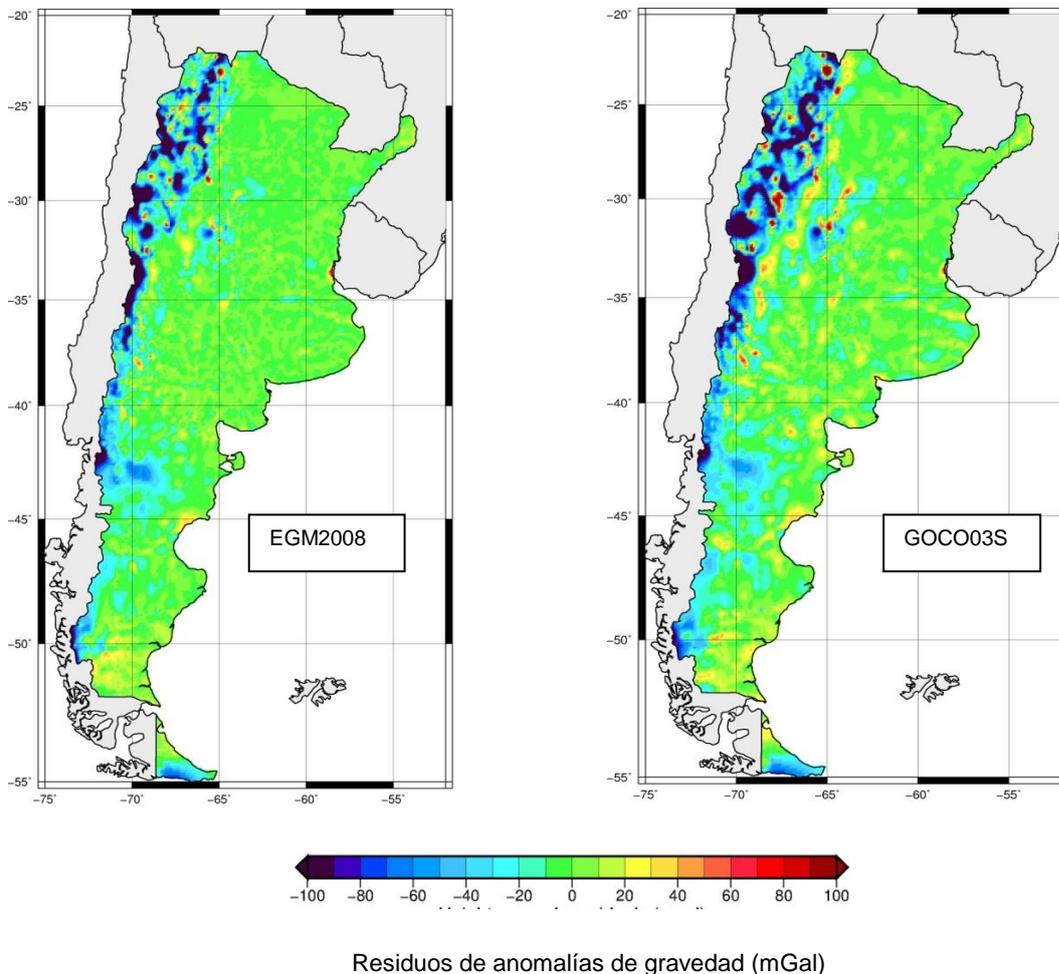


Figura 5. Mapas de residuos de anomalías de gravedad en Argentina (mGal) para los casos extremos.
Figure 5. Residues of gravity anomalies maps in Argentina (mGal) for extreme cases.

CONCLUSIONES

Del análisis estadístico de los residuos de ondulación y anomalías de gravedad se concluye que los modelos globales que mejor se ajustan a la información analizada en Argentina son aquellos modelos combinados que incluyen en su cálculo datos satelitales, de altimetría satelital y de campañas terrestres. Los modelos basados en datos satelitales solamente acusan una gran diferencia respecto de los valores terrestres.

Se agruparon los modelos analizados en dos categorías a los fines de discernir cuales son los que mejor se ajustan para la zona de estudio.

Los modelos EGM2008, EIGEN.6C3stat y EIGEN.6C2 (Categoría I) son los que presentaron los mejores resultados estadísticos en cuanto a las medidas de posición central y dispersión.

En cambio, los modelos EIGEN.6S2, GO.CONS.GCF.2.TIM.R4 y GOCO03S (Categoría 2) presentaron diferencias mayores respecto de los datos terrestres sobre los cuales fueron evaluados. El modelo GIF 48 está en un término medio entre ambas categorías para el análisis de los residuos de anomalías de gravedad, y en la Categoría I para la ondulación.

El rango de valores del desvío estándar (Categoría I) en el caso de la anomalía de gravedad resultó ser de entre 16,17 y 16,33 mgal; en tanto que para la ondulación geoidal, el rango fue de 0,27 a 0,30 metros.

En el caso de la Categoría II, los valores del desvío estándar para la anomalía de gravedad variaron entre 23,24 y 24,00 mgal; mientras que para la ondulación geoidal, la variación fue de entre 0,55 y 0,61 metros.

Debido a que los valores estadísticos obtenidos para los modelos de la Categoría I no presentaron diferencias significativas entre sí, no fue posible seleccionar cuál de ellos es el que mejor se ajusta a la Argentina.

Sin embargo, se recomienda para el uso de la comunidad científica, el modelo de geopotencial EGM2008 ya que es el que presenta un mayor desarrollo en serie de los coeficientes armónicos esféricos y cuenta con el respaldo de un procesamiento llevado a cabo por instituciones de reconocido valor científico.

BIBLIOGRAFÍA

- Barthelmes F., (2009). Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. Scientific Technical Report STR09/02, GFZ Series.
- Förste C., Flechtner F., Schmidt R., König R., Meyer U., Stubbenvoll R., Rothacher M., Barthelmes F., Neumayer K.H., Biancale R., Bruinsma S. and Lemoine J.M. (2006). A mean global gravity field model from the combination of satellite mission and altimetry/gravimetry surface gravity data. Poster presented at the EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 2/7, 2006, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 03462, 2006.
- Förste C., Bruinsma S., Flechtner F., Marty J.C., Dahle C., Abrikosov O., Lemoine J.M., Neumayer H., Barthelmes F., Biancale R., and König, R. (2013a). EIGEN-6C2 - A new combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. Geophysical Research Abstracts. Vol. 15, EGU2013-4077-1, 2013. EGU General Assembly 2013.
- Förste C., Bruinsma S., Abrikosov O., Flechtner F., Dahle C., Neumayer K.-H., Barthelmes F., König R., Marty J.C., Lemoine J.M. and Biancale R. (2013b). EIGEN-6C3 – The newest high resolution global combined gravity field model based on the 4th release of the GOCE Direct Approach - Book of Abstracts, The IAG Scientific Assembly 2013, 150th Anniversary of the IAG (Potsdam).
- Hofmann Wellenhof B. & Moritz H. (2005). Physical Geodesy. Springer Wien New York. pp 412
- ICGEM (2014) International Centre for Global Earth Models. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
- Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G. and Pavlis E.C. Rapp R.H., Olson T.R. (1998). The development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA Technical Paper NASA/TP1998206861, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- Mayer-Gürr T., Rieser D., Höck E., Brockmann J.M., Schuh W.D., Krasbutter I., Kusche J., Maier A., Krauss S., Hausleitner W., Baur O., Jäggi A., Meyer U., Prange L., Pail R., Fecher T. and Gruber T. (2012). The new combined satellite only model GOCO03s. Abstract submitted to GGHS2012, Venice (Poster).
- Pacino, M. C. & Tocho, C., 2009. Validation of the EGM2008 over Argentina. Newton's. Bulletin N.4, p. 90-98, 2009. ISSN 18108555
- Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Förste C., Goiginger H., Schuh W.D, Höck E., Reguzzoni M., Brockmann J. M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sansó F. and Tscherning C.C. (2011). First GOCE gravity field models derived by three different approaches. Journal of Geodesy, 85/11: 819-843.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. and Factor J.K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM 2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria.
- Pereira A. & Pacino M.C. (2010). "Evaluation of recent global geopotential models in Argentina", IAG Series: Gravity, Geoid and Earth Observation, Vol. 135, pp. 383-388, año 2010, ISSN 0939-9585, Springer Berlin Heidelberg Ed.
- Reigber C., Schwintzer P., Stubbenvoll R., Schmidt R., Flechtner F., Meyer U., König R., Neumayer H., Förste C., Barthelmes F., Zhu S.Y., Balmino G., Biancale R., Lemoine J.M., Meixner H. and Raimondo J.C. (2006). A high resolution global gravity field model combining CHAMP and GRACE satellite mission and surface data: EIGEN/CG01C. Scientific Technical Report STR06/07, GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam.

- Ries J.C., Bettadpur S., Poole S. and Richter T. (2011). Mean Background Gravity Fields for GRACE Processing, GRACE Science Team Meeting, Austin, TX, 8-10 August 2011
- Rudenko S., Dettmering D., Esselborn S., Schoene T., Foerste C., Lemoine J.M., Ablain M., Alexandre D. and Neumayer K.H. (2014). Influence of time variable geopotential models on precise orbits of altimetry satellites, global and regional mean sea level trends. *Advances in Space Research*, doi: 10.1016/j.asr.2014.03.010
- Tapley B.D., Ries J., Bettadpur S., Chambers D., Cheng M., Condi F., Gunter B., Kang Z., Nagel P., Pastor R., Pekker T., Poole S. and Wang F. (2005). GGM02 – An improved Earth gravity field from GRACE. *J Geod*, 79(8): 467/478.
- Villella J.C. & Pacino, M.C. (2010). Interpolación gravimétrica para el cálculo de los números geopotenciales de la red altimétrica de Argentina en zonas de alta montaña. *Geoacta*, 35: 13-26.

Recibido: 06-11-2014

Aceptado: 19-10-2015