



IGN

Instituto Geográfico Nacional
REPÚBLICA ARGENTINA



SECRETARÍA DE
CIENCIA, TECNOLOGÍA
Y PRODUCCIÓN



Ministerio de
Defensa
Presidencia de la Nación

Modelo de Geoide Gravimétrico GEOIDEAR16

Diego Piñón^{1,2}, Kefei Zhang² y Sergio Cimbaro¹

¹ Instituto Geográfico Nacional

² RMIT University



- ▶ Introducción
- ▶ Motivación
- ▶ Metodología
- ▶ Datos utilizados
- ▶ Procedimientos
- ▶ Resultados
- ▶ Conclusiones

Superficies utilizadas en geodesia

▶ Superficie topográfica

Representación de la superficie terrestre

Se representa en mapas mediante curvas de nivel

▶ Elipsoide

La sup. matemática que mejor se adapta a la forma de la Tierra

Parámetros → semieje mayor (a), achatamiento (f)

WGS-84 → $a = 6378137,0$ m, $f = 1/298,257223563$)

▶ Geoide

La “figura de la Tierra” (Gauss, 1828)

La superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que se puede aproximar al nivel medio del mar

$$H = h - N$$



http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que_es_geoide.aspx

Determinación de alturas ortométricas

► Combinar nivelación geométrica y mediciones gravimétricas

- La nivelación geométrica requiere un equipo de ~4-6 personas para recorrer ~6-12 km diarios
- Los gravímetros son instrumentos muy costosos (> U\$S100.000)
- Método complejo de cálculo



Retrieved from http://www.ngs.noaa.gov/web/about_ngo/history/NGSvertical.shtml

Determinación de alturas ortométricas

► Combinar nivelación geométrica y mediciones gravimétricas

- La nivelación geométrica requiere un equipo de ~4-6 personas para recorrer ~6-12 km diarios
- Los gravímetros son instrumentos muy costosos (> U\$S100.000)
- Método complejo de cálculo

► Combinar modelo de geoide con observaciones GPS

- Solo es necesario un operador para medir a cientos de km de distancia
- Los equipos GPS son relativamente económicos
- Es un método simple



Retrieved from http://www.ngs.noaa.gov/web/about_ngo/history/NGSverifier.html from <http://www.psurvey.com.au/#!/projects/c1xj0>

- ▶ **Determinar un modelo de geoide gravimétrico a partir de:**
 - Nuevas versiones disponibles de modelos geopotenciales globales (MGG)
 - Nuevas versiones de modelos digitales de elevación (MDE) y batimetría
 - Nuevos datos gravimétricos, altimétricos y GPS disponibles

- ▶ **Vincular el modelo de geoide al sistema altimétrico Nacional**
 - La ondulación geoidal del modelo deberá transformar una altura determinada en el marco de referencia POSGAR 2007 en una altura ortométrica referida al datum vertical IGN

- ▶ **Lograr una precisión < 20 cm**
 - Dependiendo de la densidad de datos gravimétricos disponibles
 - Densificar la red gravimétrica Nacional donde fuere necesario

Modelos de geoide existentes en la Argentina

	Modelo preliminar – 1999 (Pacino y Font, 1999)	ARG05 – 2005 (Tocho et al, 2007)	GAR – 2006 (Corchete y Pacino, 2006)
MDE	ETOPO5 (5' – 1988)	GTOPO30 (30" – 1996)	SRTM_v3 (3" – 2006)
Batimetría	ETOPO5 (5' – 1988)	KMS2002 (2' – 2002)	ETOPO2 (2' – 2001)
MGG	EGM96 (1996)	EGM96 (1996) y EIGEN_CG01C (2004)	EIGEN-GL04C (2006)
Datos gravimétricos	~ 15000	?	231808
Resolución espacial	20'	5'	1.5'
Validación	55 puntos GPS y nivelación	539 puntos GPS y nivelación	392 puntos GPS y nivelación
Desvío estándar	~ 100 cm	32 cm	21 cm

Técnica Stokes-Helmert

► Problema

Potencial de la gravedad terrestre $\rightarrow W = W_0 = cte.$

Potencial normal (sobre el geoide) $\rightarrow U_0 = W_0$

Potencial anómalo (sobre un punto arbitrario) $\rightarrow T = W - U$

T satisface la ecuación de Laplace $\rightarrow \nabla^2 T = 0$

► Solución

Potencial anómalo $\rightarrow T(\varphi, \lambda) = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(r, \psi) d\sigma$

Teorema de Bruns $\rightarrow T = \gamma N$

Formula de Stokes $\rightarrow N(\varphi, \lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma$

Técnica Remover-Computar-Restaurar (RCR)

► Espectro de longitudes de onda del campo de gravedad

Modelo Geopotencial Global (MGG) → longitud de onda larga

Mediciones gravimétricas locales → longitud de onda media y corta

Topografía del terreno → longitud de onda corta

$$\text{RCR} \rightarrow N = N_{MGG} + N_{residual} + N_{terreno}$$

Procedimiento RCR

Remove

1. Sustraer efecto de MGG sobre Δg
2. Sustraer efecto del terreno sobre $\Delta g \rightarrow$ Segunda condensación de Helmert

Computer

- \rightarrow 3. Resolver la integral de Stokes

Restore

4. Sumar la ondulación geoidal proveniente del MGG
5. Sumar el efecto indirecto del terreno

Datos gravimétricos (~650.000)

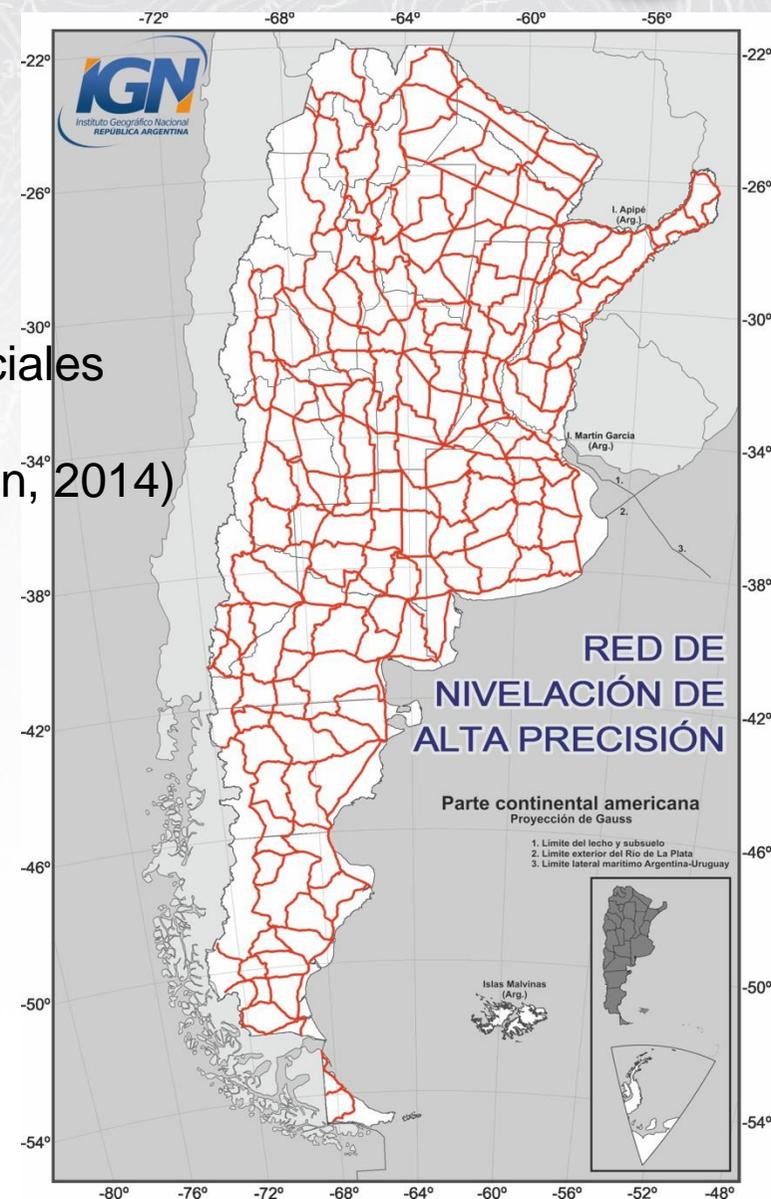
Instituto Geográfico Nacional (IGN); Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF); Instituto de Física de Rosario (IFIR); Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP); Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ); Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales (IGEBA) de la Universidad de Buenos Aires (UBA); Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT); Departamento de Física de la Universidad Nacional del Sur (UNS); Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR); Wintershall Energy S.A.; Servicio Geográfico Militar del Paraguay; Instituto Geográfico Militar de Chile; Technische Universität Berlin (Alemania); National Geospatial-Intelligence Agency (Estados Unidos); British Antarctic Survey (Inglaterra); Bureau Gravimétrique International (Francia); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japón); Marine Geoscience Data System; Rolling Deck to Repository ...



Datos altimétricos

► Nuevo ajuste de la red de nivelación (2014)

- Ajuste por min. cuad. en término de números geopotenciales
 - Determinación de alturas ortométricas de Mader (1954)
 - W_0 (Argent) = 62 636 853.8 m^2s^{-2} (Tocho, Vergos y Piñón, 2014)
 - W_0 (Global) = 62 636 853.4 m^2s^{-2} (IAG, 2015)
- Diferencia ~ 4 cm



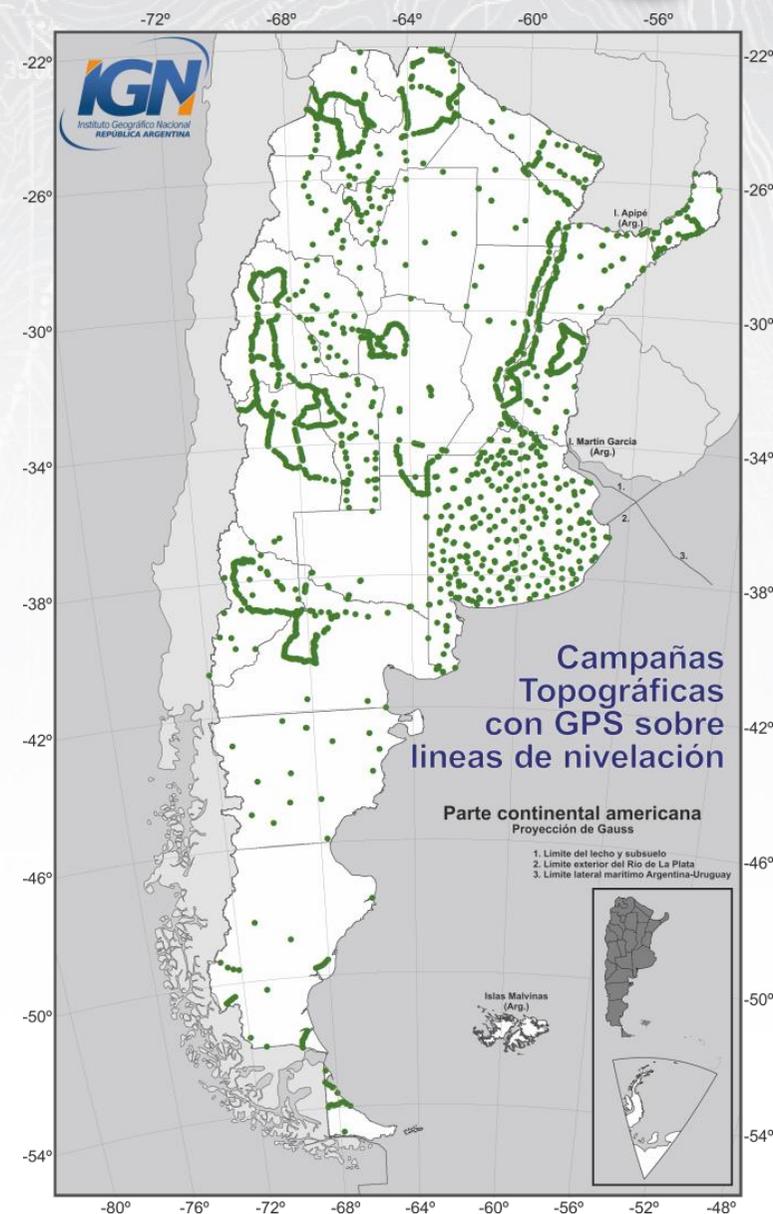
Datos GPS

▶ Marco de Referencia Geodésico Nacional (2009)

- Determinación del marco de ref. POSGAR 2007
- Basado en ITRF 2005 en la época 2006.632

▶ Nuevas mediciones sobre puntos altimétricos

- > 2.000 puntos medidos



1. Estandarización y filtrado de datos gravimétricos

- ▶ **Pasaje a sistema gravimétrico IGSN71 (Morelli et al, 1971)**
 - Muchos datos estaban referidos a otro datum gravimétrico (e.g. Potsdam)

- ▶ **Detección y eliminación de errores groseros (~50.000 puntos)**
 - Método MGG (EGM2008) y ploteo de diferencias
 - Altimetría satelital → se utilizó Sandwell et al. (2014) versión 23.1 para gravedades marinas
 - Método de colocación por mínimos cuadrados (Tscherning, 1991)

2. Reducción de datos gravimétricos – segunda condensación de Helmert

Determinación de anomalías de Bouguer refinadas

$$\Delta g^{punto} = g_{observada} - \gamma_{GRS80} + A_{AL} - A_B + C_T$$

Reducción de aire libre

$$A_{AL} = 0,3086 \times H$$

Corrección de Bouguer

$$A_{B_{tierra}} = -0,1119 \times H$$

$$A_{B_{mar}} = 0,0689 \times H$$

Corrección topográfica

Programa TC (Forsberg, 1984)

$$MDE = SRTM\ v4.1 + SRTM30_Plus$$

$$\rho_{mar} = 1,03 \text{ [g/cm}^3 \text{]}$$

$$\rho_{tierra} = 2,67 \text{ [g/cm}^3 \text{]}$$

$$r_{máximo} = 166,7 \text{ [km]}$$

Reducción atmosférica

$$\delta g_{atm} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2$$

(Wenzel, 1985)

Gravedad teórica

$$\gamma = \frac{g_{elip}(1+k \sin^2 \varphi)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \text{ (Somigliana, 1930)}$$

$$\text{Elip.} = \text{GRS80}$$



3. Eliminación de la contribución del MGG

$$\Delta g_{red}^{punto} = g_{observada} - \gamma_{GRS80} + A_{AL} - A_B + C_T - \Delta g_{MGG}$$

Modelos fueron descargados de la página Web del International Centre for Global Earth

Modelos (ICGEM) → <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>

ICGEM

International Centre for Global Earth Models (ICGEM)

Nombre	Año	Max grado	Clase	Referencia
EGM2008	2008	2190	Combinado	(Pavlis et al. 2012)
EIGEN-6C4	2014	2190	Combinado	(Förste et al. 2014)
GO_CONS_GCF_2_DIR_R5	2014	300	Satellite-only	(Bruinsma et al. 2013)
<u>GOCO05S</u>	<u>2015</u>	<u>280</u>	<u>Satellite-only</u>	<u>(Mayer-Gürr et al. 2015)</u>

Procedimientos (cont.)

Estadísticas de las diferencias entre anomalías de gravedad derivadas de MGGs y las determinadas sobre 13.558 puntos gravimétricos

Nombre	Grado	Max [mgal]	Min [mgal]	Prom [mgal]	STD [mgal]
EGM2008	280	103.83	-237.24	-7.61	24.67
	250	108.99	-216.86	-7.81	25.18
	180	124.62	-163.42	-8.23	27.09
EIGEN-6C4	280	106.43	-233.69	-7.73	24.82
	250	112.03	-213.17	-7.93	25.31
	180	124.97	-170.78	-8.32	27.22
GO_CONS_GCF_2_DIR_R5	280	115.66	-195.54	-7.50	25.49
	250	118.89	-193.87	-7.65	25.69
	180	125.29	-171.61	-8.33	27.27
GOCO05S	<u>280</u>	<u>117.02</u>	<u>-195.97</u>	<u>-7.33</u>	<u>25.50</u>
	250	120.27	-195.91	-7.58	25.62
	180	125.04	-170.66	-8.29	27.23

Nombre	Año	Max grado	Clase	Referencia
EGM2008	2008	2190	Combinado	(Pavlis et al. 2012)
EIGEN-6C4	2014	2190	Combinado	(Förste et al. 2014)
GO_CONS_GCF_2_DIR_R5	2014	300	Satellite-only	(Bruinsma et al. 2013)
<u>GOCO05S</u>	<u>2015</u>	<u>280</u>	<u>Satellite-only</u>	<u>(Mayer-Gürr et al. 2015)</u>

4. Interpolación de datos gravimétricos

- ▶ **Para resolver la integral de Stokes a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) se necesitan los datos gravimétricos en una grilla regular**
 - Inconveniente → los datos gravimétricos no están distribuidos en forma homogénea

- ▶ **Se analizaron distintos métodos de interpolación**
 - Curvatura mínima con tensión
 - Media móvil ponderada → función de peso = inversa de la distancia al cuadrado
 - **Kriging (ordinario)**
 - Kriging universal (\approx colocación por mínimos cuadrados)

Procedimientos (cont.)

5. Tapado de huecos gravimétricos

- ▶ Se necesita una grilla o modelo para cubrir grandes huecos gravimétricos que existen en la zona de estudio
- ▶ Se analizaron distintos modelos

Modelo / Grillas	Año	Resolución
EGM2008	2008	5'
IAG South American Gravity Grid	2006	5'
WGM2012	2012	2'
DTU13	2013	1'



5. Tapado de huecos gravimétricos

- ▶ Estadísticas de las diferencias entre anomalías de gravedad derivadas de las grillas y las determinadas sobre 13.558 puntos gravimétricos

Modelo / Grillas	Max [mgal]	Min [mgal]	Prom [mgal]	STD [mgal]
EGM2008	134.01	-209.64	-6.24	27.90
IAG	134.26	-213.63	-6.45	27.61
WGM2012	76.56	-138.62	-1.18	9.20
<u>DTU13</u>	<u>72.96</u>	<u>-124.31</u>	<u>-1.24</u>	<u>9.15</u>

6. Resolución de la integral de Stokes

► Se analizaron dos métodos

- Aproximación esférica de 1D a partir de la técnica FFT (Haagmans, De Min & Van Gelderen 1993)
- **Aproximación esférica multi-banda a partir de la técnica FFT (Forsberg & Sideris 1993) → SPFOUR (Forsberg, 1992)**

► **Modificación Wong-Gore (1969) del kernel de Stokes**

- Remueve los términos de grado bajo del polinomio de Legendre (P_n) filtrando las contribuciones de longitud de onda larga de los datos gravimétricos locales

6. Resolución de la integral de Stokes

► Se analizaron dos métodos

- Aproximación esférica de 1D a partir de la técnica FFT (Haagmans, De Min & Van Gelderen 1993)
- **Aproximación esférica multi-banda a partir de la técnica FFT (Forsberg & Sideris 1993) → SPFOUR (Forsberg, 1992)**

Estadísticas de las diferencias entre los geoides determinados con ambos métodos y ~2000 puntos GPS-nivelación

Método	Max [m]	Min [m]	Prom [m]	STD [m]
<u>Aproximación esférica multi-banda FFT</u>	<u>2.34</u>	<u>-0.71</u>	<u>0.68</u>	<u>0.23</u>
Aproximación esférica 1D FFT	2.41	-0.75	0.69	0.24

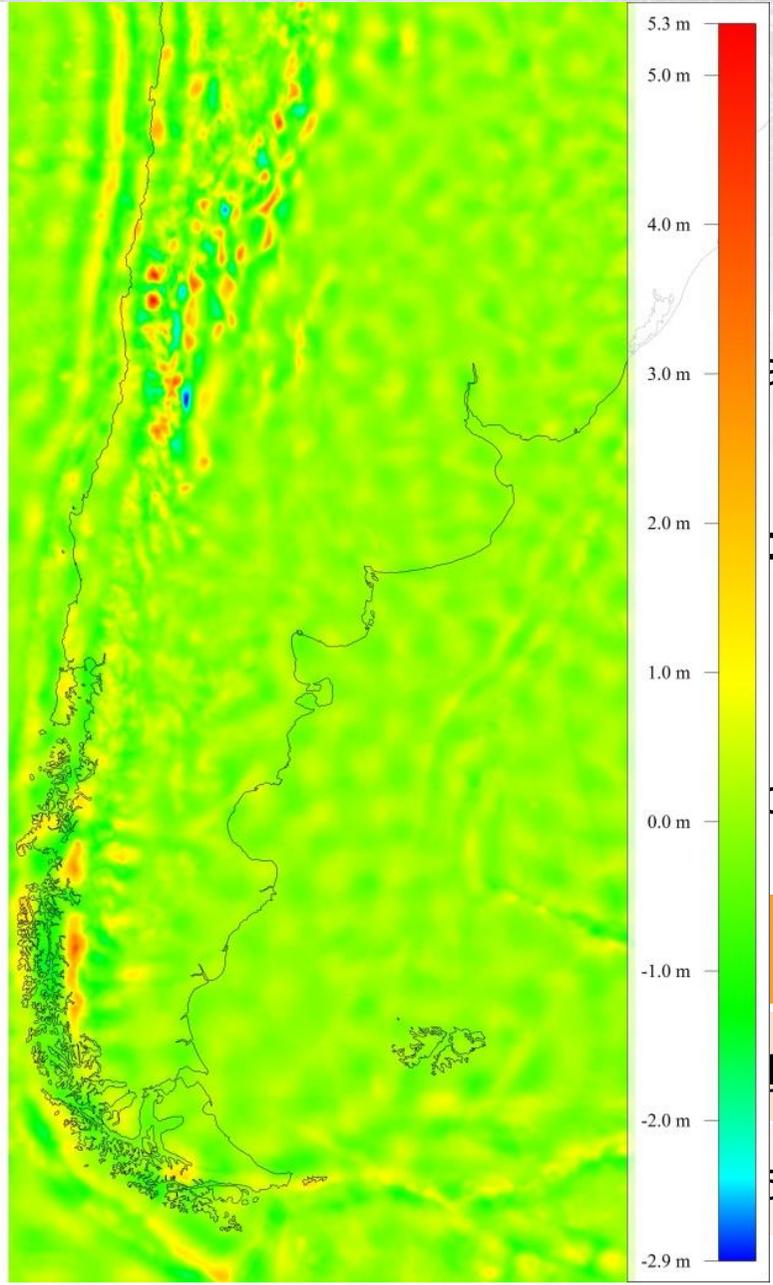
Procedimientos (cont.)

6. Resolución de la i

► Se analizaron dos métodos

- Aproximación esférica (Gelderen 1993)
- Aproximación esférica 1D (1993) → SPFOUR (F)

Estadísticas de las diferencias



Wagmans, De Min & Van

ca FFT (Forsberg & Sideris

os con ambos métodos

Método
Aproximación esférica multi-b
Aproximación esférica 1D

	Prom [m]	STD [m]
1	<u>0.68</u>	<u>0.23</u>
5	0.69	0.24

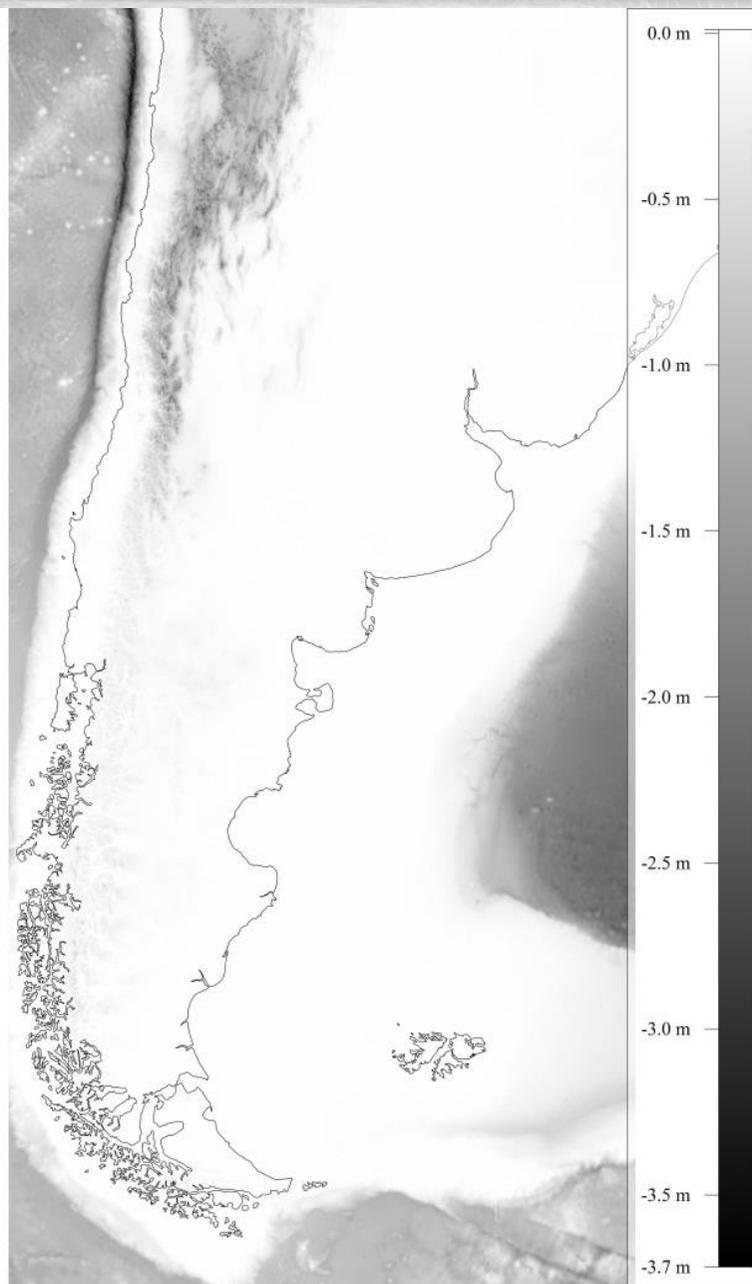
7. Determinación del efecto indirecto del terreno – segunda condensación de Helmert

- ▶ La condensación de las masas topográficas sobre el geoide genera un desplazamiento del potencial gravitatorio, y por lo tanto la resolución de la integral de Stokes da origen a un co-geoide

- ▶ **Determinación del efecto indirecto del terreno ($N_{indirecto}$)**
 - GCOMB (Forsberg, 1992)
 - MDE = SRTM v4.1 + SRTM30_Plus

7. Determinación de la condensación de He

- ▶ La condensación de la gravedad genera un desplazamiento del potencial gravimétrico que se calcula a partir de la integral de Stokes dada por:
- ▶ Determinación del efecto de la condensación de la gravedad (correcto)



no – segunda

geoide genera un
tanto la resolución de la

recto)

8. Determinación del modelo de geoide

▶ Determinación de la contribución del MGG (N_{MGG})

- GOCO05S (grado y orden 280)

▶ Determinación del geoide

- $N = N_{MGG} + N_{residual} + N_{indirecto}$

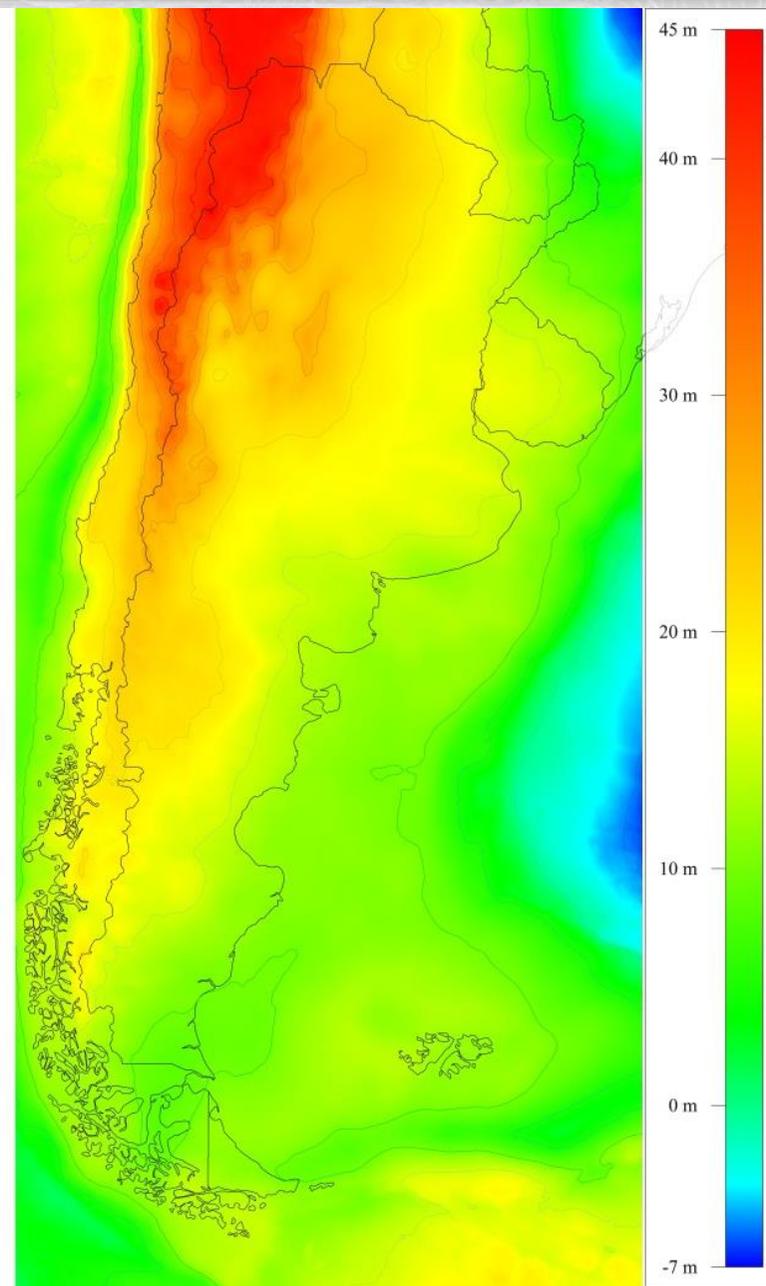
8. Determinación de

► Determinación de la c

- GOCO05S (grado y c

► Determinación del geo

- $N = N_{MGG} + N_{residual}$



9. Ajuste al datum vertical de Argentina

▶ Ajuste a puntos GPS-nivelación

▶ Método aplicado

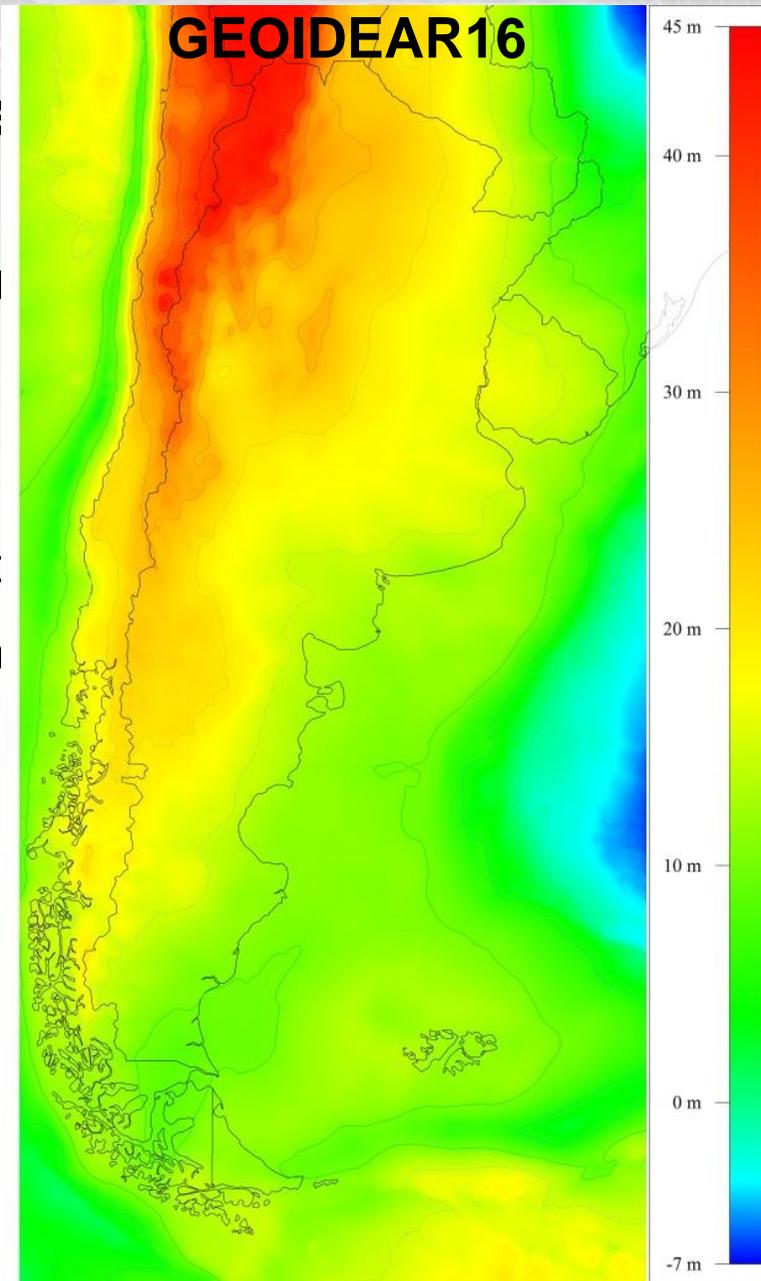
- Determinación de superficie de tendencia → modelo de 4 parámetros
- Los residuales fueron modelado mediante el método de colocación por mínimos cuadrados utilizando el modelo de segundo orden Gauss-Markov

9. Ajuste al datum vertical

▶ Ajuste a puntos GPS-

▶ Método aplicado

- Determinación de sup
- Los residuales fueron cuadrados utilizando

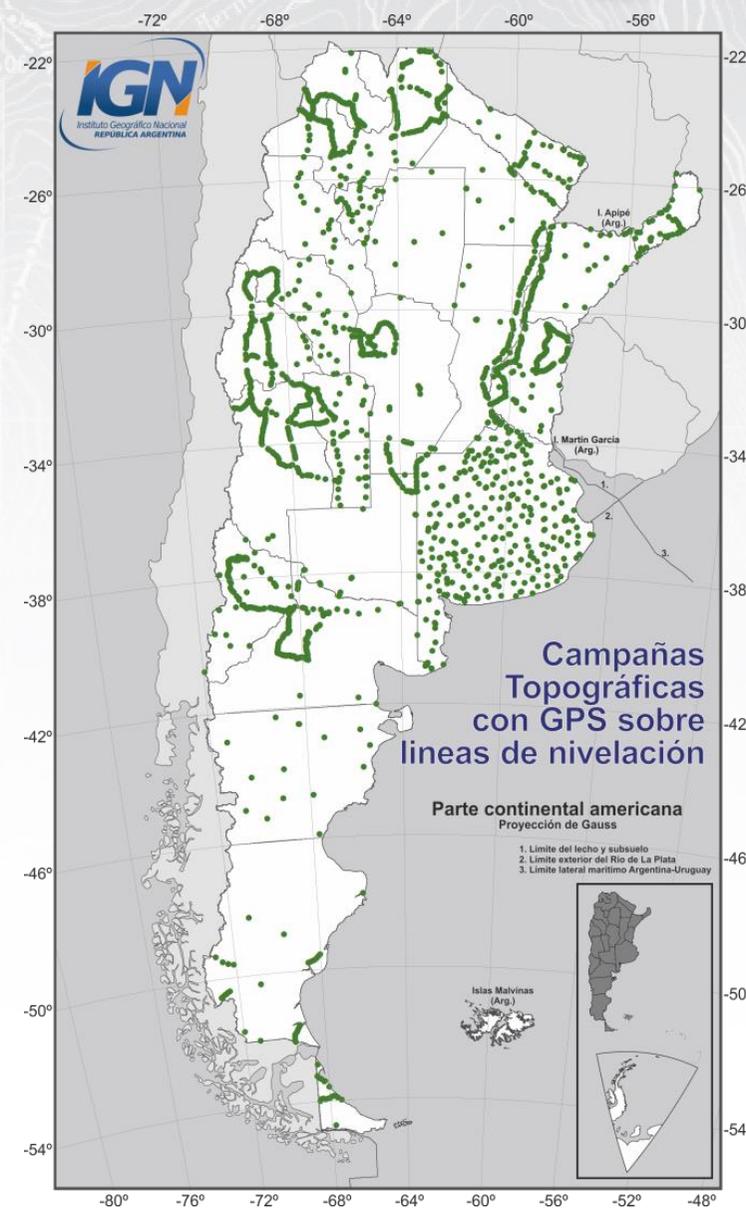


parámetros
ubicación por mínimos
Markov

Validación del modelo GEOIDEAR16

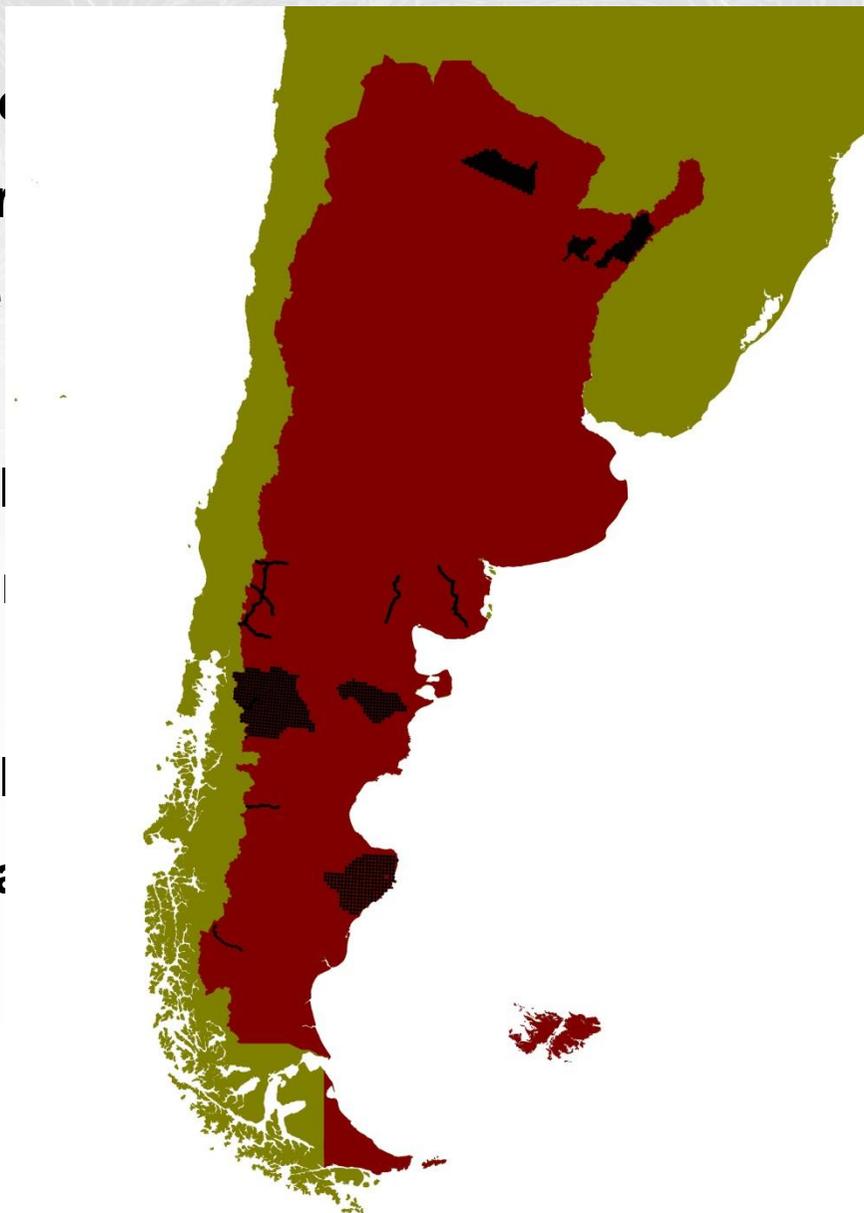
- ▶ Estadísticas de las diferencias entre la ondulación geoidal derivada de ~2000 puntos GPS-nivelación y la ondulación derivada de los siguientes modelos: GEOIDEAR16, ARG05, GAR y EGM2008

Geoide / GGM	Max [m]	Min [m]	Prom [m]	STD [m]
<u>GEOIDEAR16</u>	<u>0.32</u>	<u>-0.36</u>	<u>0.00</u>	<u>0.05</u>
ARG05	5.32	-0.04	1.92	0.59
GAR	1.75	-2.13	-0.09	0.29
EGM2008	1.62	-0.93	0.22	0.26



- ▶ **Se ha determinado un nuevo modelo de geoide para la república Argentina. De acuerdo a los resultados obtenidos es el modelo más preciso para la Argentina del que se dispone actualmente.**
- ▶ **El IGN ha desarrollado un plan para medir con GPS ~1200 puntos altimétricos de la red de alta precisión en los próximos 3 años**
- ▶ **El IGN ha desarrollado un plan para medir ~6000 puntos gravimétrico en los próximo 3 años para cubrir algunos “huecos”**

- ▶ Se ha determinado
De acuerdo a los r
Argentina del que
- ▶ El IGN ha desarrol
altimétricos de la
- ▶ El IGN ha desarrol
próximo 3 años pa



la república Argentina.
más preciso para la

-1200 puntos
os 3 años

itos gravimétrico en los

- ▶ Esperamos poder publicar el modelo GEOIDEAR16 en el transcurso de este año en la página Web del IGN.

GEO IDEAR 16

Modelo de Geoide Argentino



MUCHAS GRACIAS