

HACIA UN NUEVO MODELO DE GEOIDE PARA LA ARGENTINA

Diego Piñón ^{1,2}, Kefei Zhang ¹, Suqin Wu ¹ y Sergio Cimbaro ²

¹ RMIT University

² Instituto Geográfico Nacional

XXVII Reunión Científica de La Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas
10-14 de noviembre de 2014



Indice

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

Introducción

Superficies utilizadas en geodesia

- **Superficie topográfica**

- Representación de la superficie terrestre
- Se representa en mapas mediante curvas de nivel

- **Elipsoide**

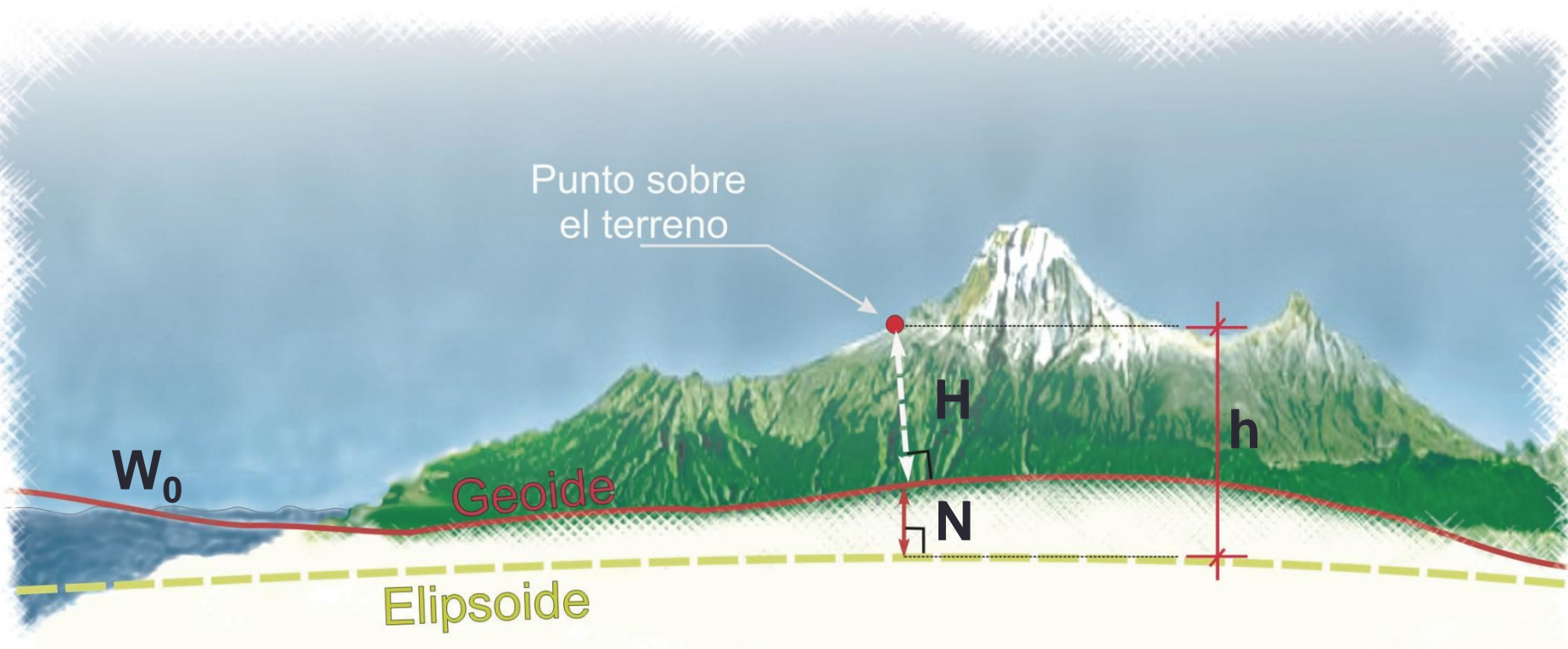
- La superficie matemática que mejor se adapta a la forma de la Tierra
- Parámetros \rightarrow semieje mayor (a), achatamiento (f)
WGS-84 $\rightarrow a = 6378137,0$ m, $f = 1/298,257223563$

- **Geoide**

- La “figura de la Tierra” (Gauss, 1828)
- La superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre que se puede aproximar a la nivel medio del mar

Introducción (cont.)

$$H = h - N$$



Introducción (cont.)

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 $\nabla^2 T = 0$

Introducción (cont.)

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

Método espectral remover-computar-restaurar (RRC)

- Modelo Geopotential Global (MGG) \rightarrow longitud de onda larga
- Medición gravimétrica local \rightarrow longitud de onda media y corta
- Topografía del terreno \rightarrow longitud de onda corta

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

Introducción (cont.)

Procedimiento RCR

Restaurar
Computar
Remove

1. Sustraer efecto de MGG sobre Δg
2. Sustraer efecto del terreno sobre Δg
- 3. Resolver la integral de Stokes utilizando $\Delta g_{reducido}$
4. Sumar la ondulación geoidal proveniente del MGG
5. Sumar el efecto indirecto del terreno

Introducción (cont.)

Modelo Geopotential Global (MGG)

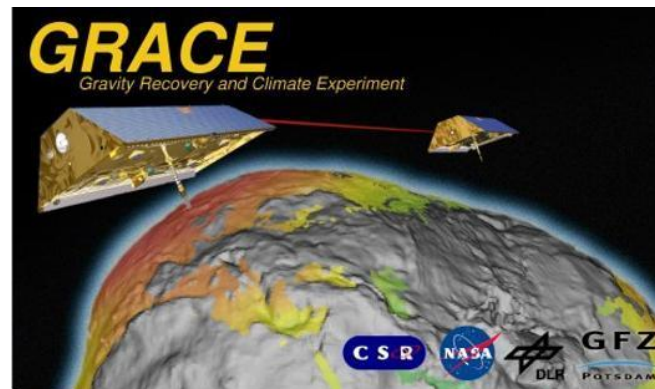
- Están expresados en términos de series de esféricos armónicos
- Contienen la longitud de onda larga del campo de gravedad terrestre
- Derivan de datos de misiones gravimétricas satelitales, como por ejemplo:

Año 2000



<http://op.gfz-potsdam.de/champ/>

Año 2002



<http://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE>

Año 2007

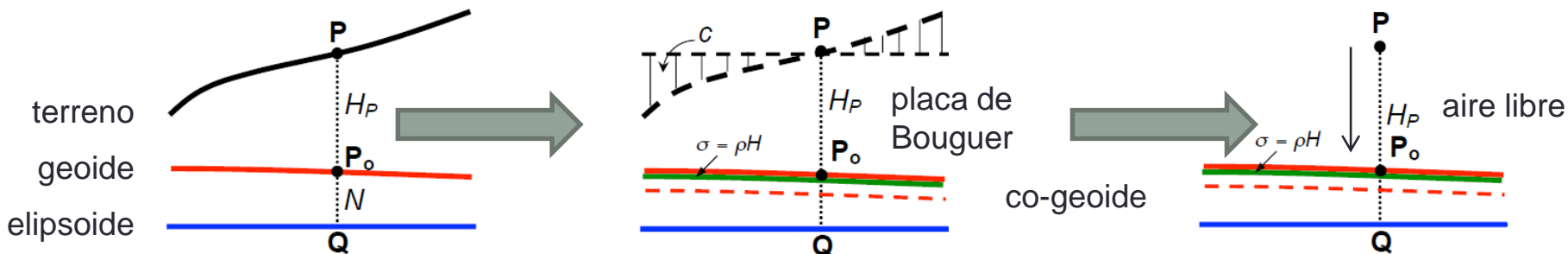


<http://orbiterchspaceneeds.blogspot.com.au>

Introducción (cont.)

Terreno – Segunda condensación de Helmert (1884)

- **Efecto directo** → placa de Bouguer (A_B) y corrección topográfica (C_T)
 - $A_B = 2\pi G\rho H$
 - $C_T \cong \frac{G\rho R^2}{2} \iint_{\sigma} \frac{(H-H_P)^2}{l^3} d\sigma$ (Moritz, 1968)
 - Técnica de integración de prismas rectangulares (Nagy et al., 2000)
- **Continuación descendiente** → corrección de aire libre (A_{AL})
 - $A_{AL} = -\frac{\partial g}{\partial H} H \cong -\frac{\partial \gamma}{\partial h} H$ (Heiskanen y Moritz, 1967)



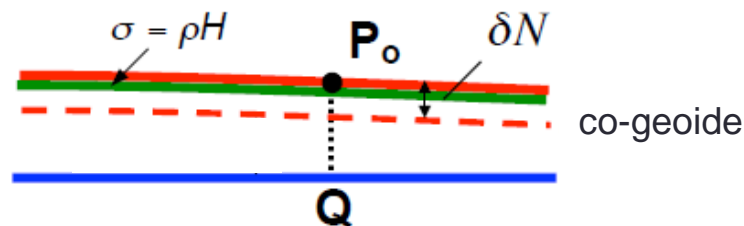
Introducción (cont.)

Terreno – Segunda condensación de Helmert (1884)

- **Efecto indirecto** (δN) \rightarrow la condensación de las masas modifica el potencial de gravedad y por lo tanto el geoide

- $N = N^{cogeide} + \delta N$

- Aprox. plana $\rightarrow \delta N = \frac{-\pi G \rho H_P^2}{\gamma} - \frac{G \rho R^2}{6\gamma} \iint_{\sigma} \frac{H^3 - H_P^3}{l^3} d\sigma$ (Wichiencharoen, 1982)



Introducción (cont.)

Integral de Stokes – Aproximación esférica multi-banda mediante transformada rápida de Fourier (FFT)

- **Modificación Wong y Gore (1969) en el 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.

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

$$\bullet S_{mod}(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^{N_2} \alpha(n) \frac{2n+1}{n-1} P_n \cos \psi$$

$$\bullet \alpha(n) = \begin{cases} 1 & \text{si } 2 \leq n \leq N_1 \\ \frac{N_2-n}{N_2-N_1} & \text{si } N_1 \leq n \leq N_2, \\ 0 & \text{si } N_2 \leq n \leq N \end{cases} \quad n = 2, \dots, N$$

Motivación

- Generar un nuevo modelo de geoide con una precisión inferior a los 20 cm.
- Comparar las nuevas versiones de modelos geopotenciales y de elevaciones disponibles, e identificar la versión óptima para determinar el nuevo geoide.
- Generar un nuevo proyecto para densificar con mediciones gravimétricas el territorio Nacional.

Motivación (cont.)

Modelos de geoide existentes de 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 GPS y nivelación	539 GPS y nivelación	392 GPS y nivelación
Desvío estándar	~ 100 cm	32 cm	21 cm

Set de datos



Instituto Geográfico
Nacional



Instituto de Física
Rosario



IGEB, Facultad de
Ciencias Exactas y
Naturales, UBA



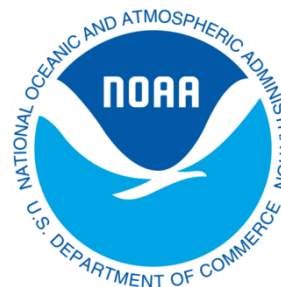
LAGAMA, Facultad de
Ciencias Exactas y
Tecnología, UNT



Instituto Brasileiro de
Geografia e Estatística



Bureau Gravimétrique
International



U.S. National Oceanic
and Atmospheric
Administration

Set de datos (cont.)

Pronto...



Yacimientos Petrolíferos
Fiscales



Servicio Geológico Minero
Argentino



Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, UNSJ

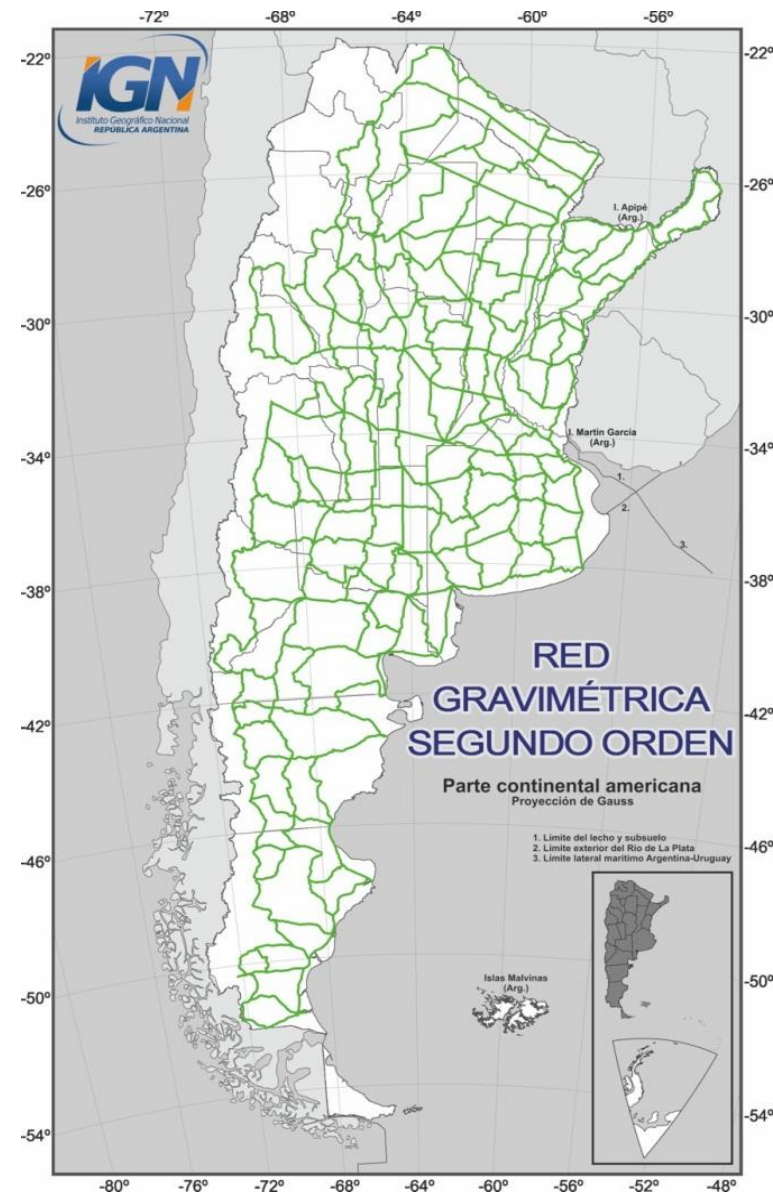
Set de datos (cont.)

Datos gravimétricos

- **Red absoluta**
 - 1991 → 5 puntos
 - 2014 → 35 puntos

- **Red de Primer Orden**
 - 1969 → 86 puntos
 - 2014 → 209 puntos
 - 2015 → ~ 230 puntos

- **Red de Segundo Orden**
 - 2014 → ~ 7000 puntos
 - 2015 → ~ 13000 puntos



Set de datos (cont.)

Datos altimétricos

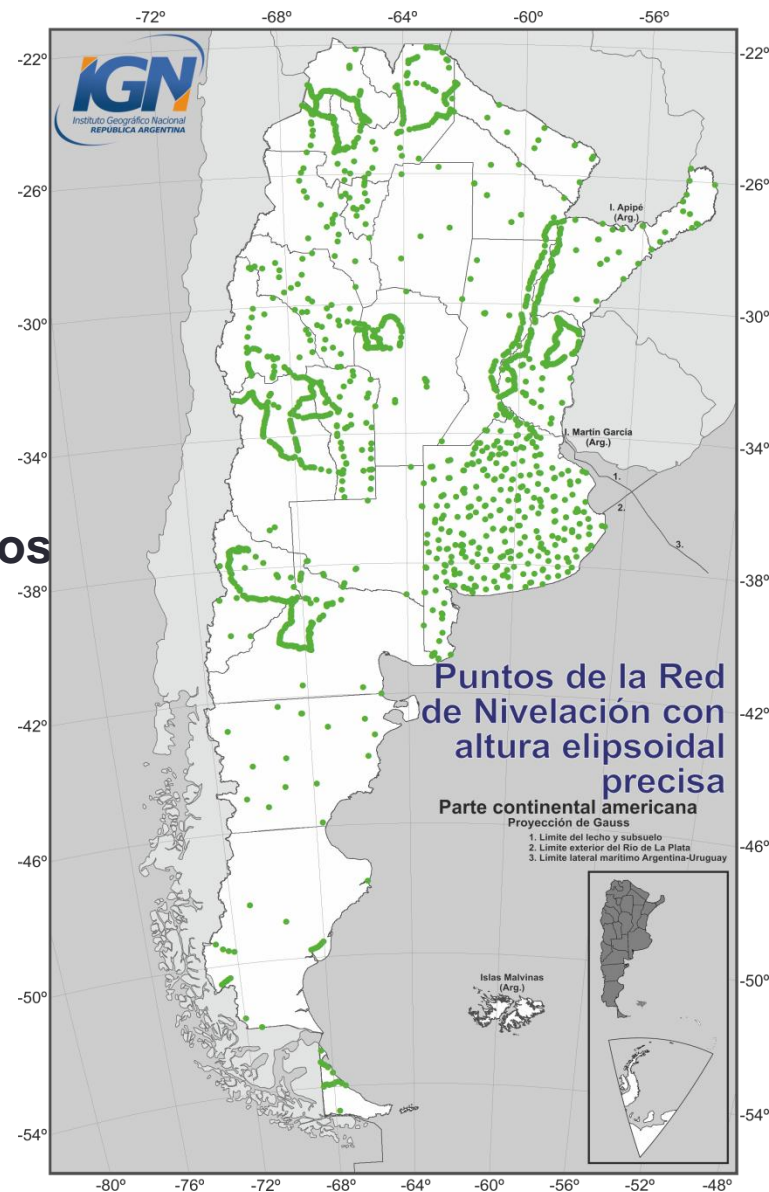
- **Nuevo ajuste de la red de nivelación**
 - 2014 → ~ 18000 puntos
 - 2015 → ~ 36000 puntos



Set de datos (cont.)

Datos GPS

- **Red POSGAR 2007 (ITRF05 2006.632)**
 - 2009 → 729 puntos
- **Nuevas mediciones sobre puntos altimétricos**
 - 2011-2014 → 1123 puntos



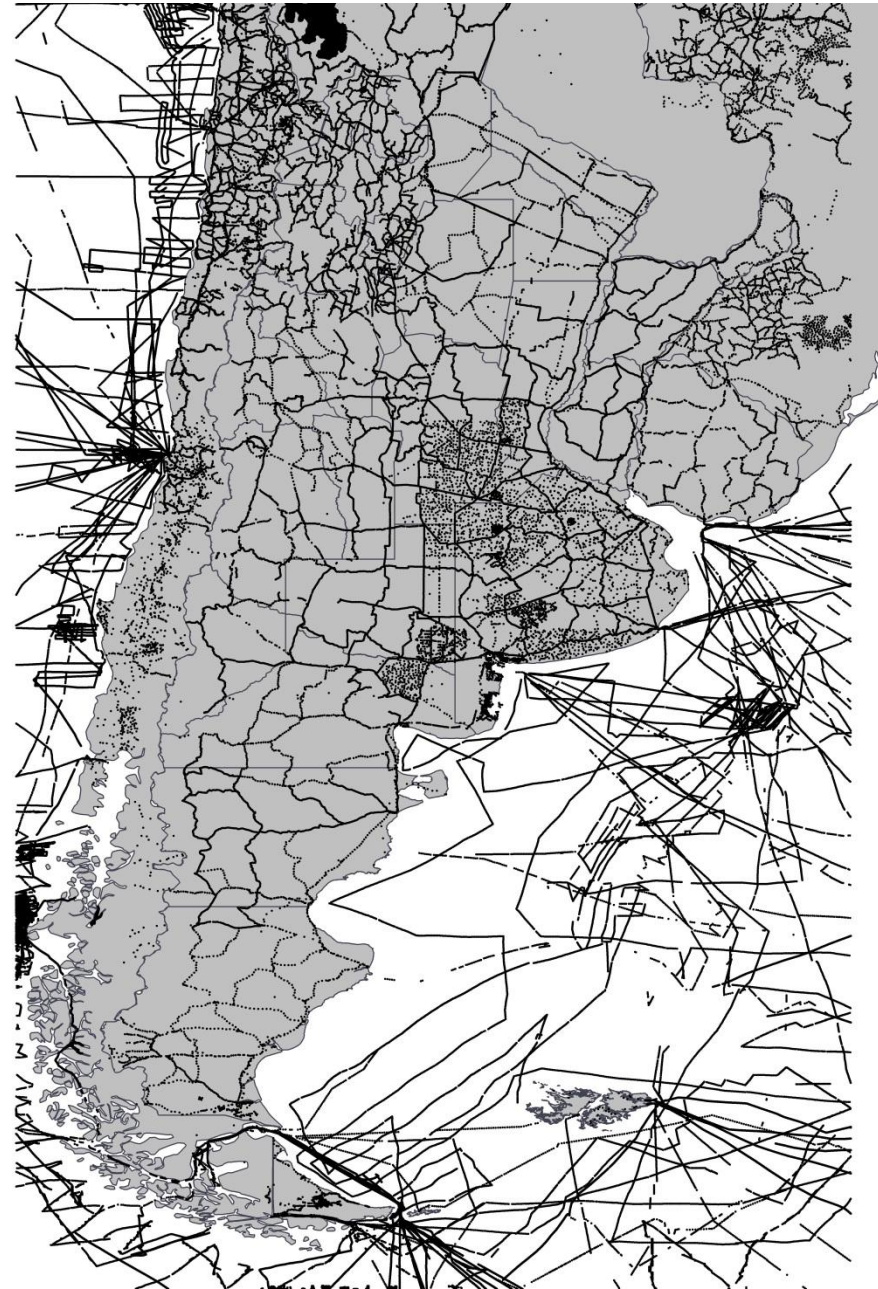
Procedimiento

Puntos gravimétricos

- Tierra = 58117
- Mar = 172909
- Total = 231026

Sistema de Referencia

- IGSN 71 (Morelli et al, 1971)



Procedimiento (cont.)

Calculo de anomalía de Bouguer refinada

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

- **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 (grilla de 6") + SRTM30_Plus (grilla de 30")

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

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

- $r_{máximo} = 166,7 \text{ [km]}$

- **Reducción atmosférica**

- $\delta g_{atm} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2$ (Wenzel, 1985)

- **Gravedad teórica**

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

- Elip. = GRS80



Procedimiento (cont.)

Eliminar contribución del MGG

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

- **EGM08 (Pavlis et al, 2008)**
 - n = 2190
 - Datos → GRACE, gravedad terrestre y altimetría satelital
- **EIGEN-6C2 (Förste et al, 2012)**
 - n = 1962
 - Datos → GOCE, GRACE, SLR (Lageos 1/2) y DTU10 (modelo global de anomalías terrestres).
- **GOCO03S (Mayer-Gürr et al, 2012)**
 - n = 250
 - Datos → GOCE, GRACE, CHAMP y SLR (Lageos 1/2).

Procedimiento (cont.)

ICGEM

International Centre for Global Earth Models (ICGEM)

44 nuevos modelos desde el año 2006...

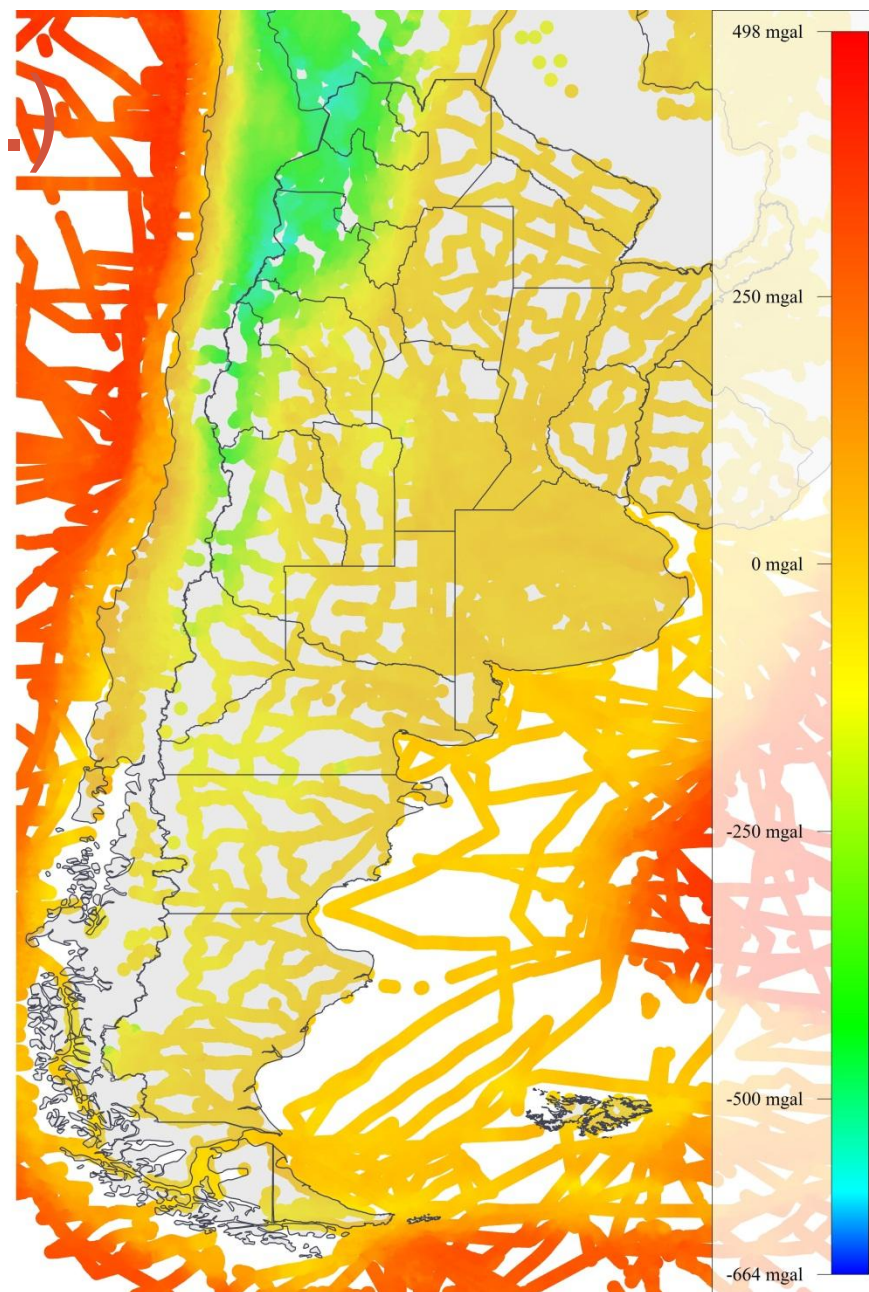
Model	Year	Degree	Data	Reference
EIGEN-6S2	2014	260	S(Goce,Grace,Lageos)	Rudenko et al. 2014
GGM05S	2014	180	S(Grace)	Tapley et al, 2013
EIGEN-6C3stat	2014	1949	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2012
Tongji-GRACE01	2013	160	S(Grace)	Chen et al, 2013
JYY_GOCE02S	2013	230	S(Goce)	Yi et al, 2013
GOGRA02S	2013	230	S(Goce,Grace)	Yi et al, 2013
ULux_CHAMP2013s	2013	120	S(Champ)	Weigelt et al, 2013
ITG-Goce02	2013	240	S(Goce)	Schall et al, 2014
GO_CONS_GCF_2_TIM_R4	2013	250	S(Goce)	Pail et al, 2011
GO_CONS_GCF_2_DIR_R4	2013	260	S(Goce,Grace,Lageos)	Bruinsma et al, 2013
EIGEN-6C2	2012	1949	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2012
DGM-1S	2012	250	S(Goce,Grace)	Farahani, et al. 2013
GOCO03S	2012	250	S(Goce,Grace,...)	Mayer-Gürr, et al. 2012
GO_CONS_GCF_2_DIR_R3	2011	240	S(Goce,Grace,Lageos)	Bruinsma et al, 2010
GO_CONS_GCF_2_TIM_R3	2011	250	S(Goce)	Pail et al, 2011
GIF48	2011	360	S(Grace),G,A	Ries et al, 2011
EIGEN-6C	2011	1420	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2011
EIGEN-6S	2011	240	S(Goce,Grace,Lageos)	Förste et al, 2011
GOCO02S	2011	250	S(Goce,Grace,...)	Goiginger et al, 2011
AIUB-GRACE03S	2011	160	S(Grace)	Jäggi et al, 2011
GO_CONS_GCF_2_DIR_R2	2011	240	S(Goce)	Bruinsma et al, 2010
GO_CONS_GCF_2_TIM_R2	2011	250	S(Goce)	Pail et al, 2011
GO_CONS_GCF_2_SPW_R2	2011	240	S(Goce)	Migliaccio et al, 2011
GO_CONS_GCF_2_DIR_R1	2010	240	S(Goce)	Bruinsma et al, 2010
GO_CONS_GCF_2_TIM_R1	2010	224	S(Goce)	Pail et al, 2010a
GO_CONS_GCF_2_SPW_R1	2010	210	S(Goce)	Migliaccio et al, 2010
GOCO01S	2010	224	S(Goce,Grace)	Pail et al, 2010b
EIGEN-51C	2010	359	S(Grace,Champ),G,A	Bruinsma et al, 2010
AIUB-CHAMP03S	2010	100	S(Champ)	Prange, 2011
EIGEN-CHAMP05S	2010	150	S(Champ)	Flechtner et al, 2010
ITG-Grace2010s	2010	180	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2010
AIUB-GRACE02S	2009	150	S(Grace)	Jäggi et al, 2009
GGM03C	2009	360	S(Grace),G,A	Tapley et al, 2007
GGM03S	2008	180	S(Grace)	Tapley et al, 2007
AIUB-GRACE01S	2008	120	S(Grace)	Jäggi et al, 2008
EIGEN-5S	2008	150	S(Grace,Lageos)	Förste et al, 2008
EIGEN-5C	2008	360	S(Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2008
EGM2008	2008	2190	S(Grace),G,A	Pavlis et al, 2008
ITG-Grace03	2007	180	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2007
AIUB-CHAMP01S	2007	90	S(Champ)	Prange et al, 2009
ITG-Grace02s	2006	170	S(Grace)	Mayer-Gürr et al, 2006
EIGEN-GL04S1	2006	150	S(Grace,Lageos)	Förste et al, 2006
EIGEN-GL04C	2006	360	S(Grace,Lageos),G,A	Förste et al, 2006

Procedimiento (cont.)

Interpolación mediante
la distancia inversa
elevada a una potencia

$$\Delta g_{red}^{punto} \rightarrow \Delta g_{red}^{grilla}$$

- **Potencia** = 2
- **Radio máximo** = 12' \cong 20 km
- **Resolución** = 18" \cong 500 m



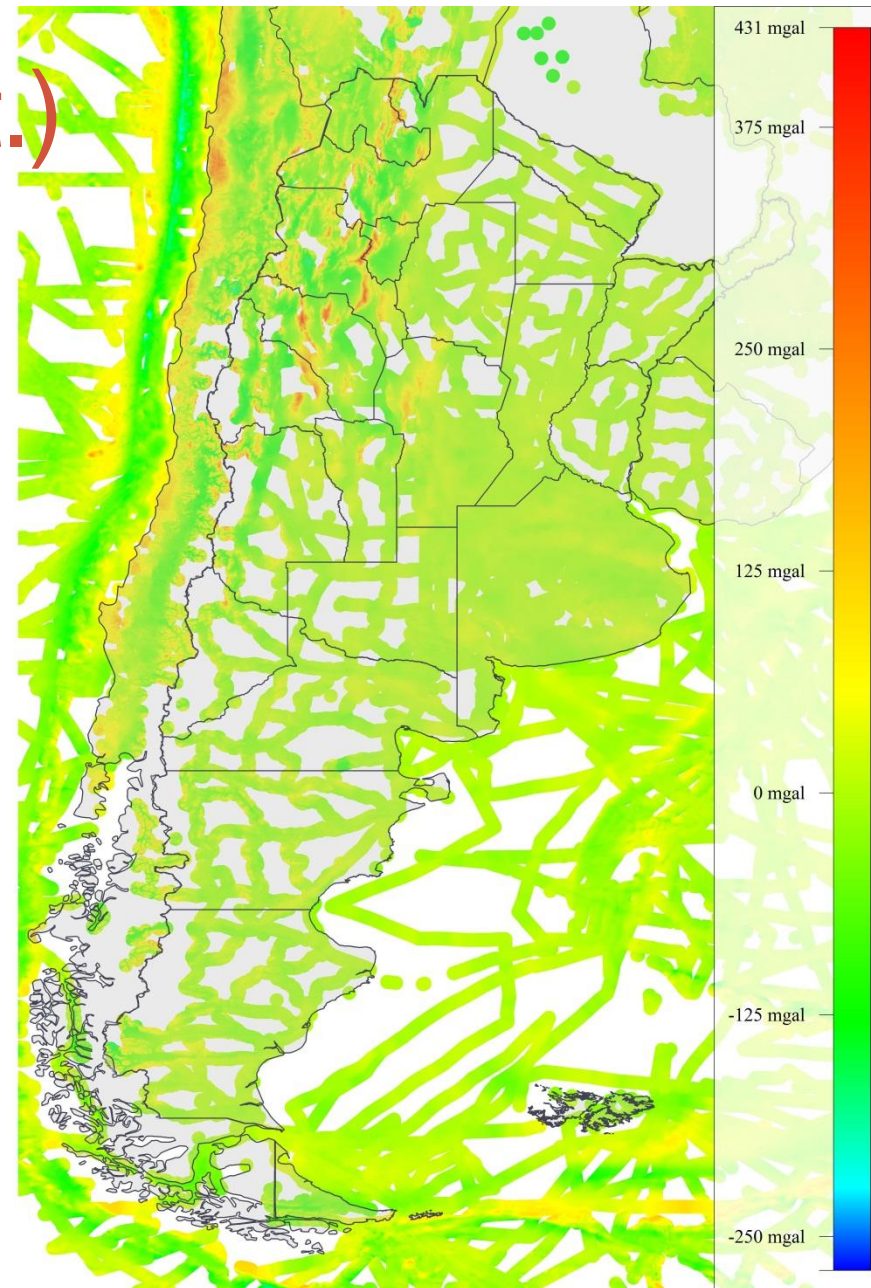
Procedimiento (cont.)

Suma de contribución del Terreno (placa de Bouguer)

$$\Delta g_{helmert}^{grilla} = \Delta g_{red}^{grilla} + A_B^{grilla}$$

• Corrección de Bouguer

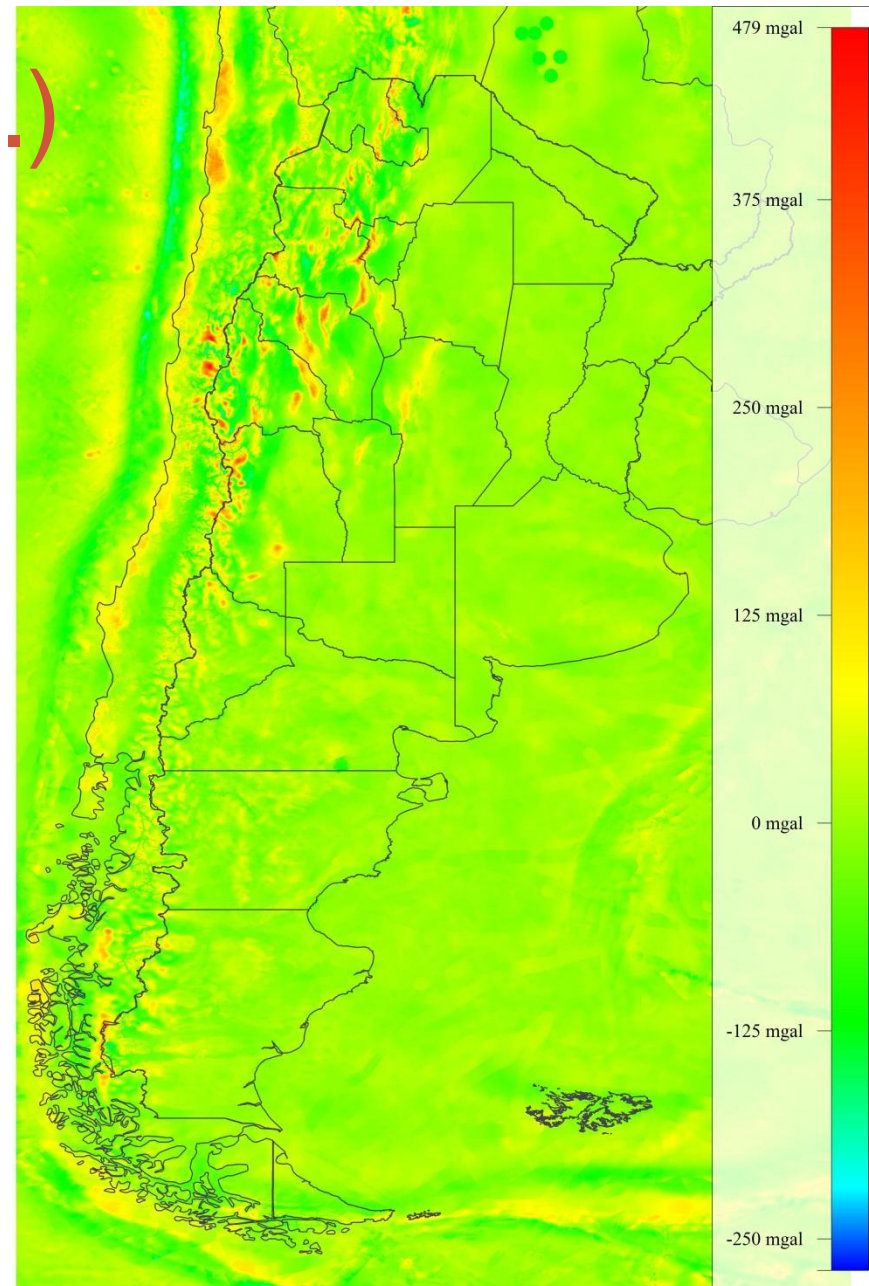
- MDE = SRTM v4.1 (grilla de 3") + SRTM30_Plus (grilla de 30")
- $A_{B_{tierra}} = -0,1119 \times H$
- $A_{B_{mar}} = 0,0689 \times H$



Procedimiento (cont.)

Rellenado de huecos

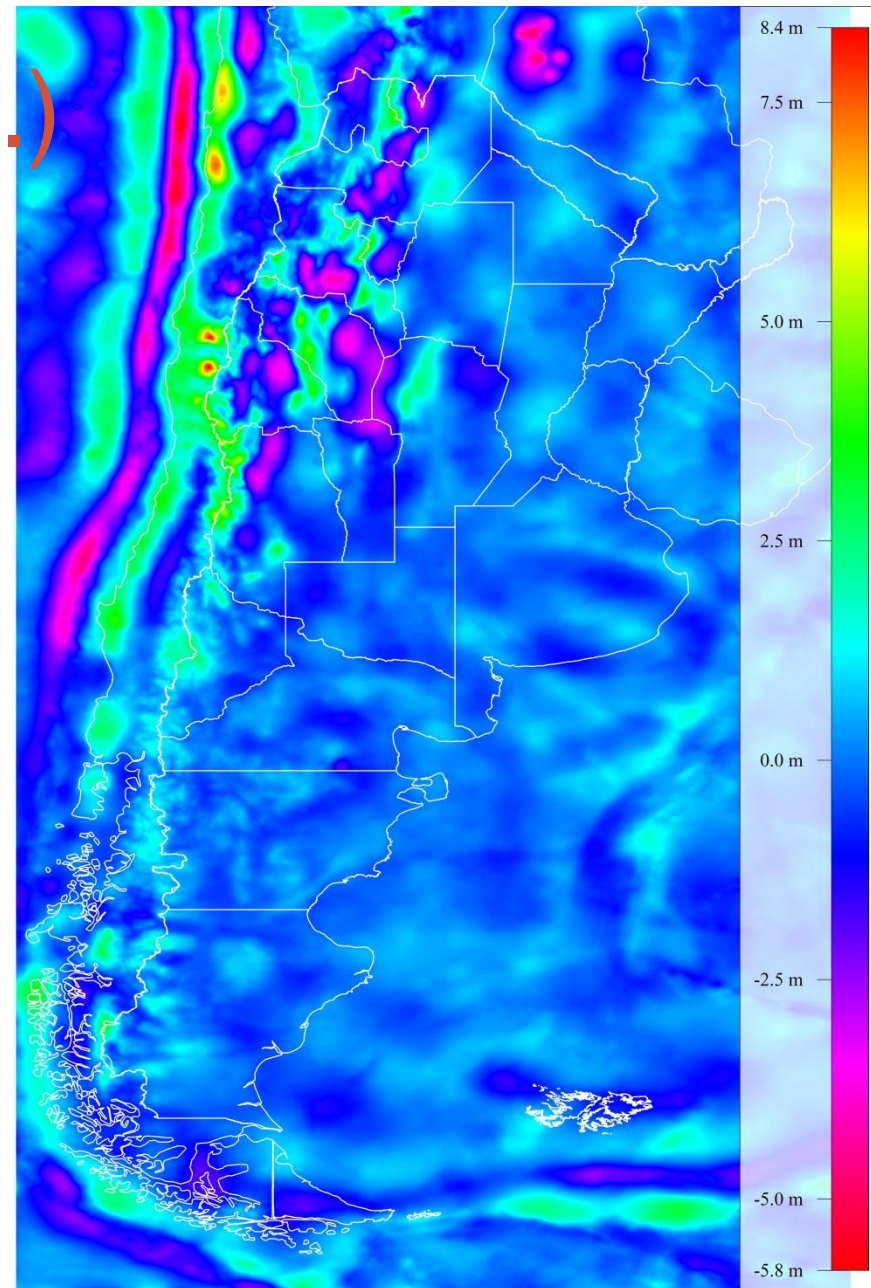
- **World Gravimetric Model 2012 (BGI)**
 - Resolución 2'
 - EGM2008
 - ETOPO1



Procedimiento (cont.)

Cálculo de la integral de Stokes ($N_{residual}$)

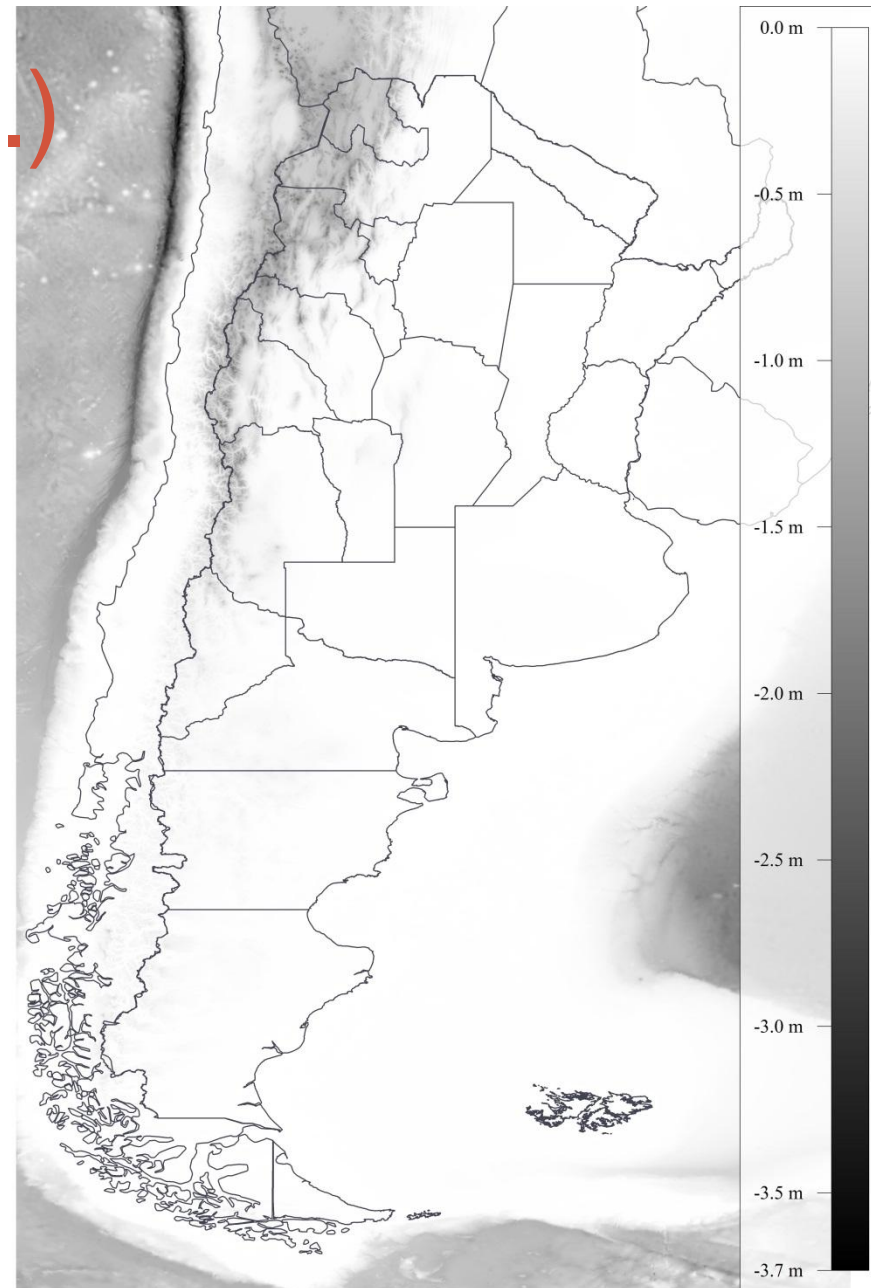
- **SPFOUR** (Forsberg, 1992)
 - Transformada rápida de Fourier (FFT)
 - Aproximación esférica multi-banda
 - Modificación de kernel Wong-Gore
 - $n = 30$



Procedimiento (cont.)

Cálculo del efecto indirecto ($N_{indirecto}$)

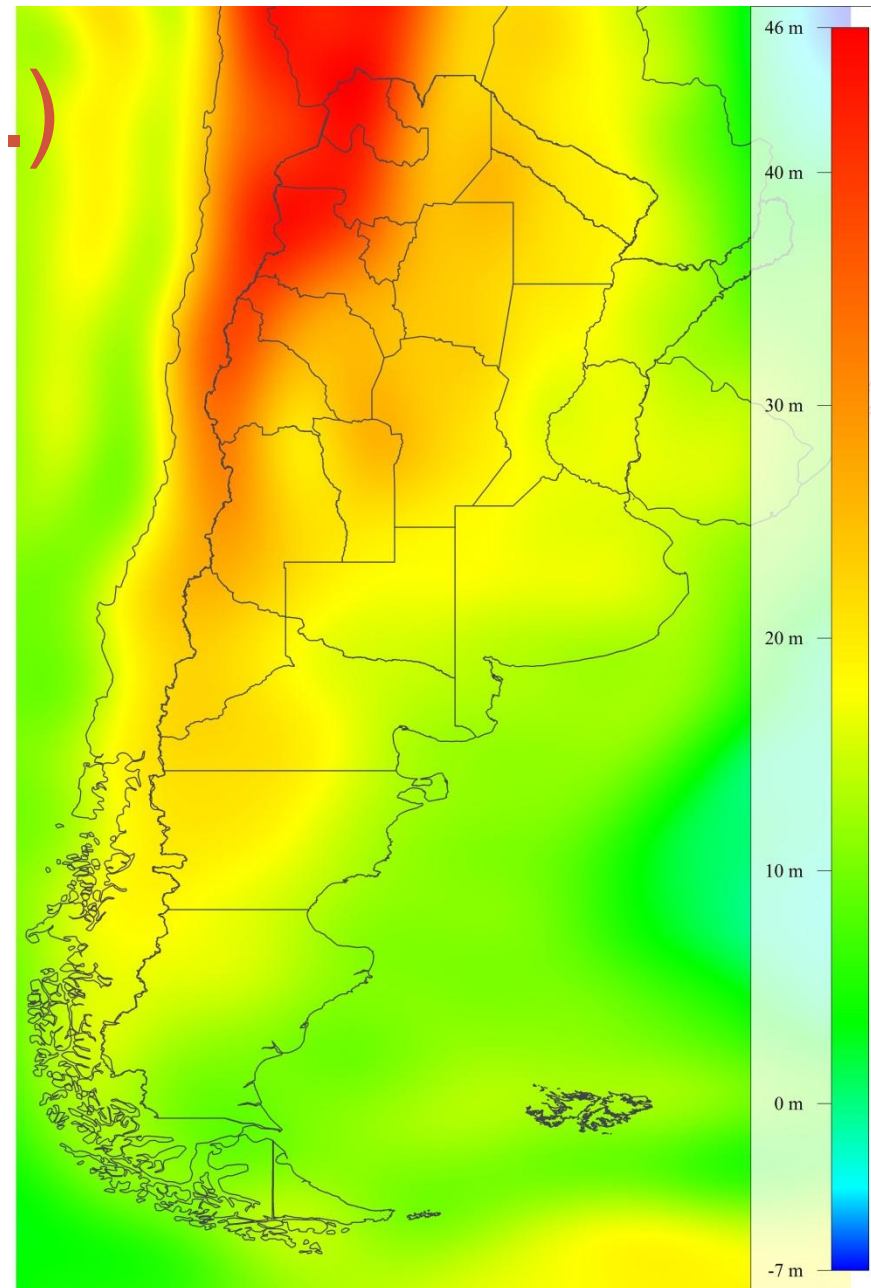
- **GCOMB** (Forsberg, 1992)
 - MDE = SRTM v4.1 (grilla de 18") + SRTM30_Plus (grilla de 30")



Procedimiento (cont.)

Cálculo de la ondulación del MGG (N_{MGG})

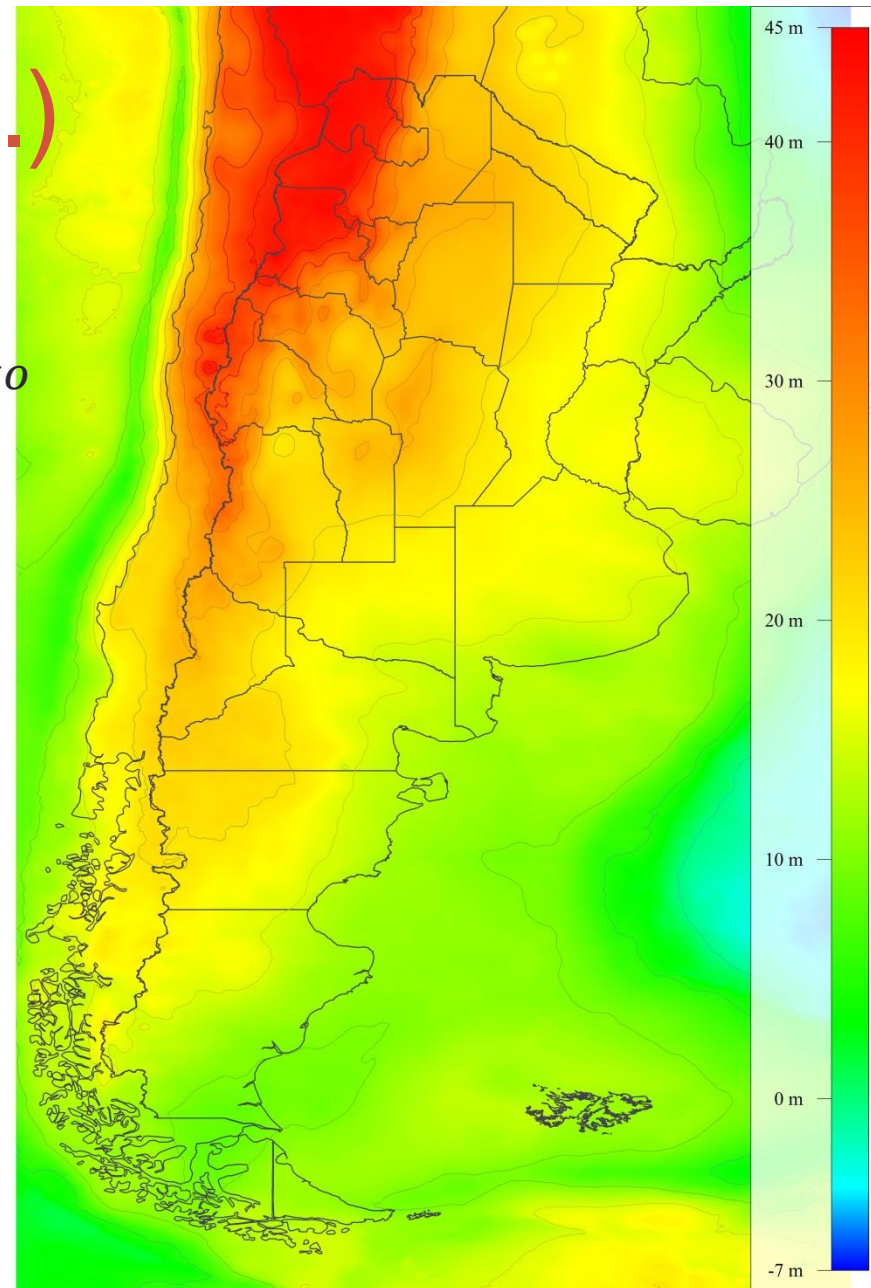
- GEOEGM (Forsberg, 1992)



Procedimiento (cont.)

Geoide (GEOAR)

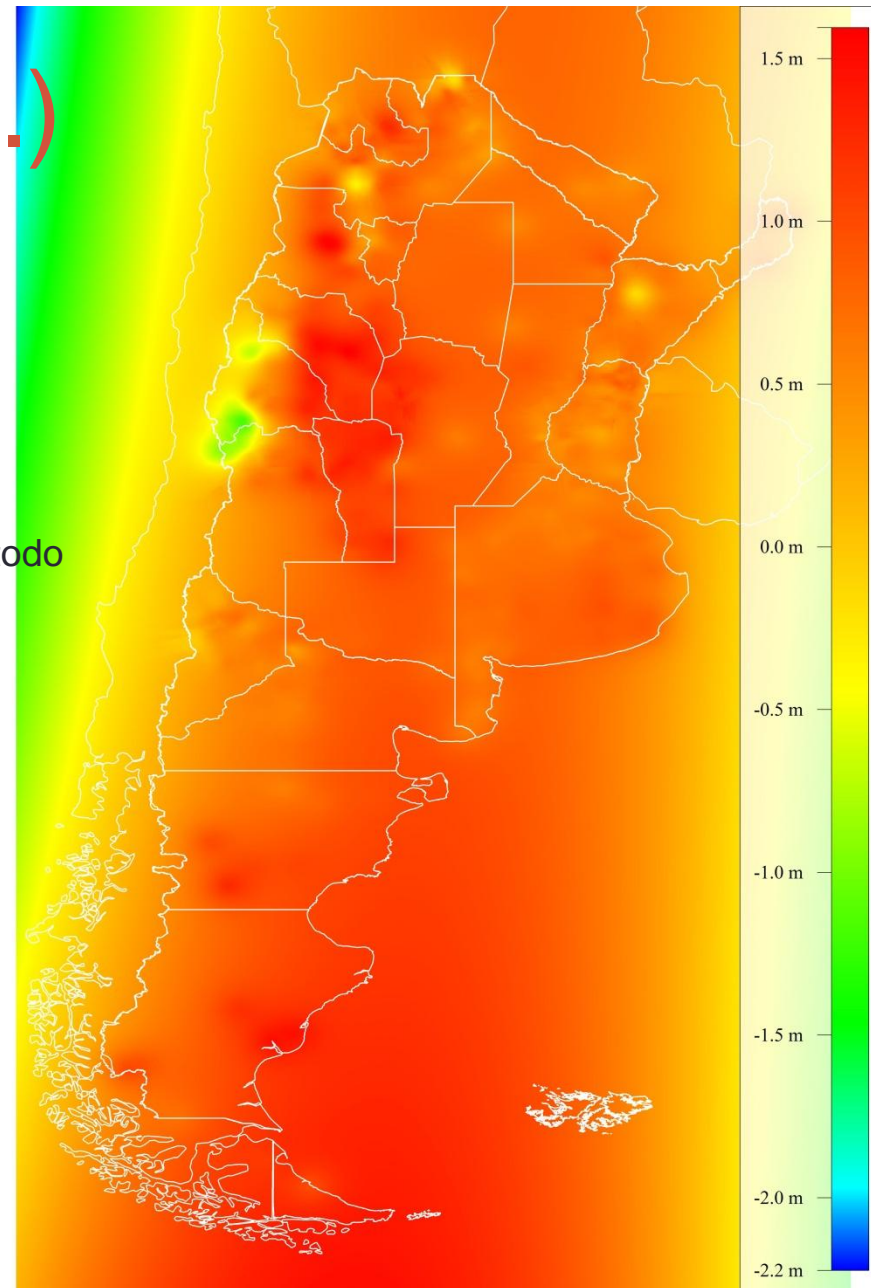
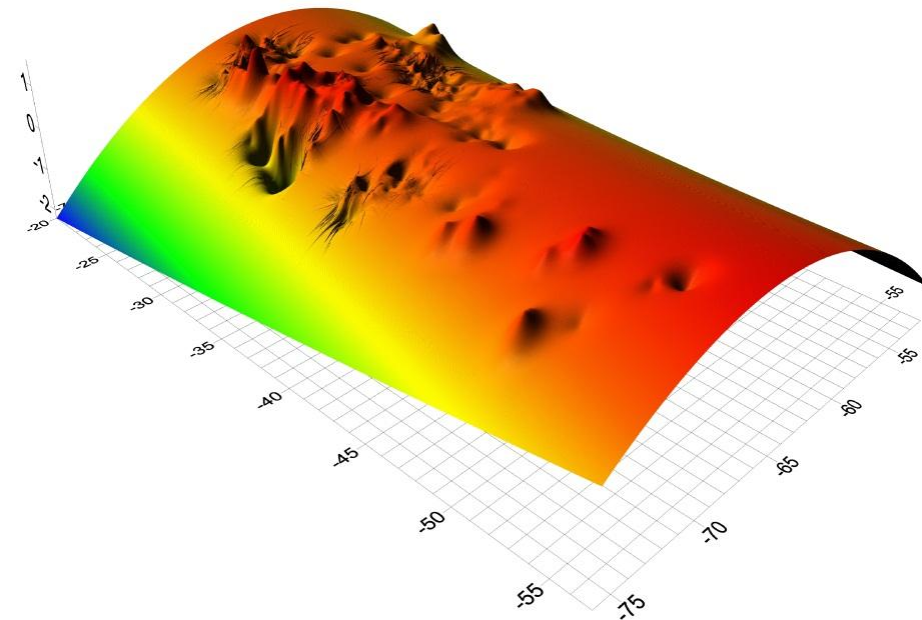
$$N = N_{MGG} + N_{residual} + N_{indirecto}$$



Procedimiento (cont.)

Superficie correctiva

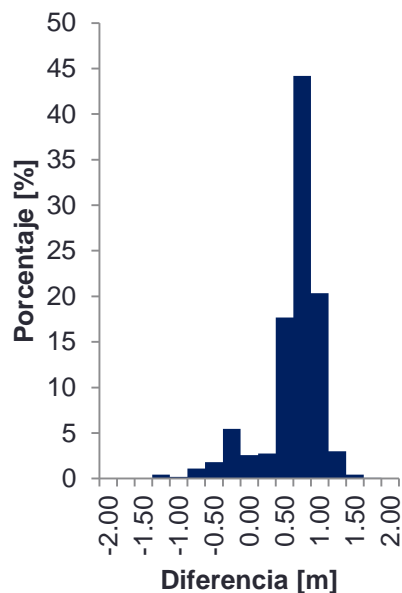
- Ajuste a puntos GPS + nivelación
- Método
 - Los residuales fueron modelado mediante el método de colocación por mínimos cuadrados utilizando el modelo de segundo orden de Gauss-Markov



Resultados

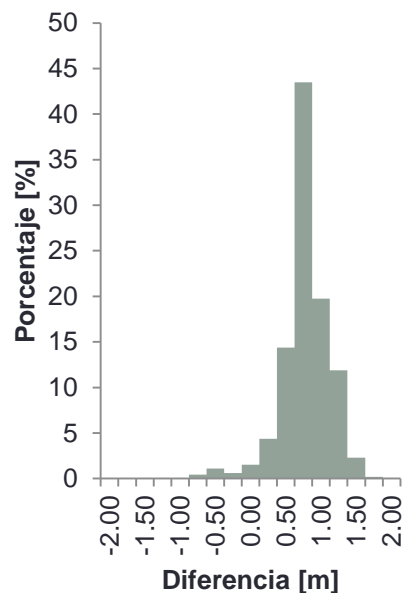
Resultados previos al ajuste (1170 puntos)

GPS/niv. –
EGM08 (n=2190)



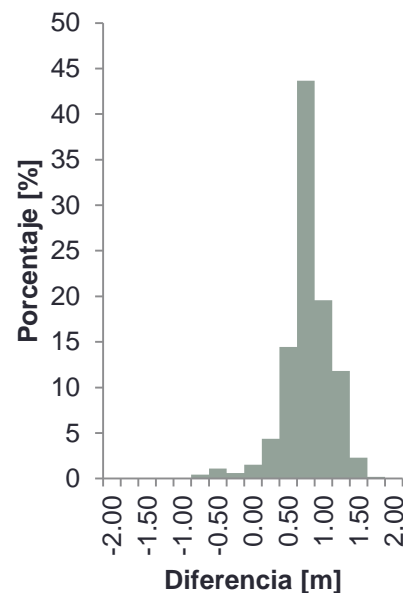
Min	-1.42 m
Max	1.53 m
Media	0.52 m
Desv std	0.41 m

GPS/niv. –
GEOAR_{EGM08}



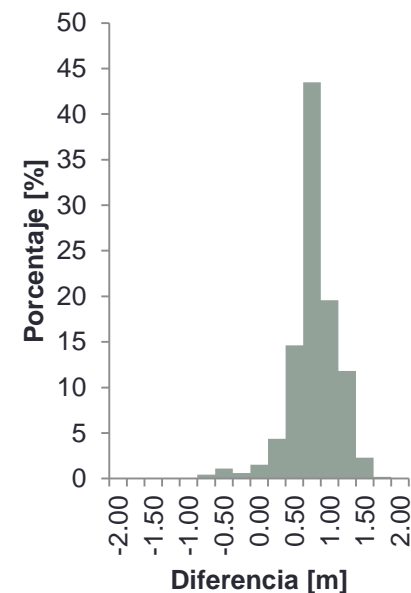
Min	-0.96 m
Max	1.55 m
Media	0.65 m
Desv std	0.34 m

GPS/niv. –
GEOAR_{EIGEN}



Min	-0.97 m
Max	1.60 m
Media	0.64 m
Desv std	0.34 m

GPS/niv. –
GEOAR_{GOCO}

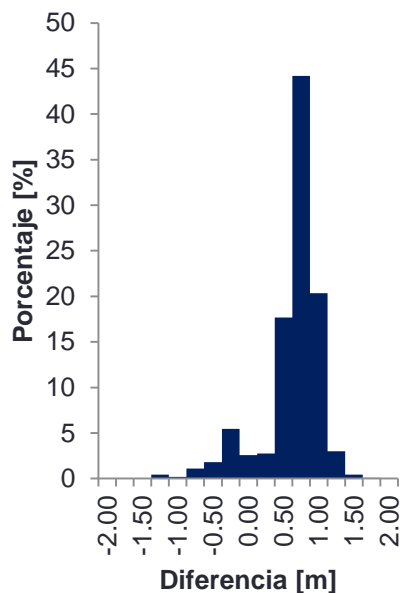


Min	-0.96 m
Max	1.55 m
Media	0.65 m
Desv std	0.34 m

Resultados (cont.)

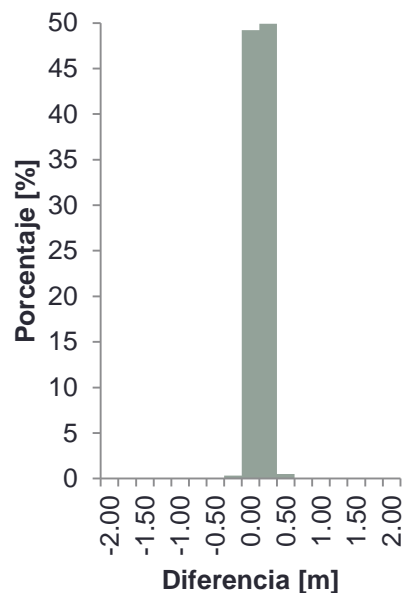
Resultados luego del ajuste (1170 puntos)

GPS/niv. –
EGM08 (n=2190)



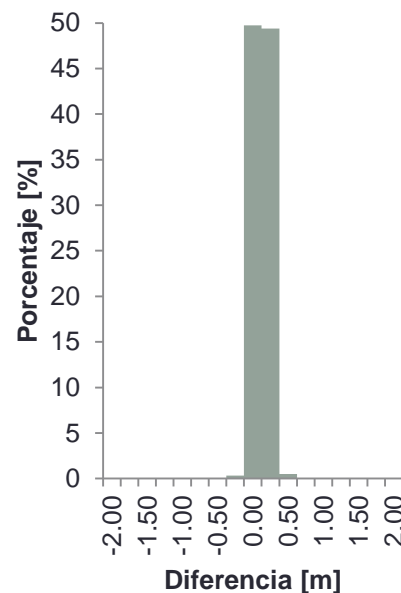
Min	-1.42 m
Max	1.53 m
Media	0.52 m
Desv std	0.41 m

GPS/niv. –
GEOAR_{EGM08}



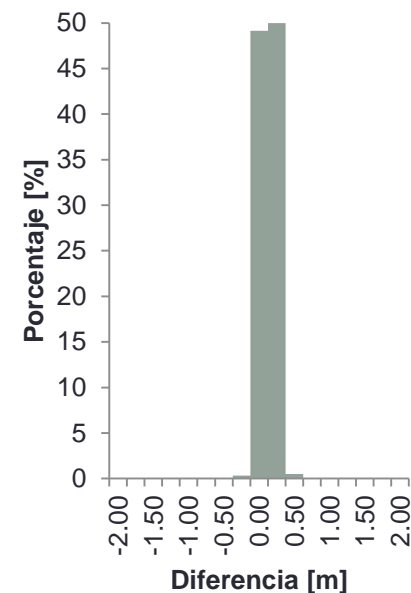
Min	-0.31 m
Max	0.32 m
Media	0.00 m
Desv std	0.05 m

GPS/niv. –
GEOAR_{EIGEN}



Min	-0.31 m
Max	0.32 m
Media	0.00 m
Desv std	0.05 m

GPS/niv. –
GEOAR_{GOCO}



Min	-0.31 m
Max	0.32 m
Media	0.00 m
Desv std	0.05 m

Conclusiones

- Se han obtenido resultados muy positivos.
- Se deben identificar y eliminar algunos errores groseros del set de datos.
- Se deben definir algunos parámetros y fórmulas.
- Pronto se contará con nuevos datos gravimétricos que permitirán cubrir zonas carentes de información.
- La publicación de GEOAR está estimada para fines de 2015.
- El IGN está trabajando en un nuevo proyecto de densificación gravimétrica que comenzaría en el año 2016.

Muchas gracias por su atención

