

**EXCESO DE GRAVEDAD EN LA SIERRA GRANDE DE SAN LUIS  
OBTENIDO A PARTIR DE ONDULACIONES DEL GEOIDE. ESTUDIO  
PRELIMINAR REALIZADO SOBRE UNA SECCION TRANSVERSAL  
(CENTRADA EN 32°50' S)**

*Laura Cornaglia<sup>1</sup> y Antonio Introcaso<sup>2</sup>*

Grupo de Geofísica - Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR). Avda. Pellegrini 250. (2000) Rosario, Santa Fe. Argentina. <sup>1</sup>cornagli@fceia.unr.edu.ar; <sup>2</sup>geofisic@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es demostrar que las ondulaciones del geoide constituyen otra herramienta para analizar las estructuras geológicas. Ellas reemplazan o complementan a los estudios que emplean gravimetría tradicional. El estudio se realizó sobre una sección de unos 135 km de longitud, que cruza transversalmente el eje de la Sierra Grande de San Luis, con 44 valores de gravedad localizada en aproximadamente 32°50' latitud sur.

Se realizó el cálculo bidimensional de las ondulaciones del geoide empleando el método de fuentes equivalentes utilizando a las anomalías de aire libre como dato de entrada. Esta ondulación 'real' obtenida se comparó con las provenientes de modelos compensados isostáticamente en las hipótesis propuestas por Pratt y Airy. También y con el fin de validar los resultados alcanzados por este camino, se calcularon, nuevamente en 2D, las anomalías simples de Bouguer y las anomalías pseudoisostáticas. Ambos resultados bidimensionales están señalando un exceso de gravedad para la sección analizada.

**Palabras clave:** Estructura geológica - gravedad - geoide - isostasia

## ABSTRACT

The aim of this study is to show geoid undulations as another tool for analysing geological structures. It can replace or complement gravity traditional studies. We have analyzed a cross-section about 135 km long crossing Sierra Grande de San Luis, at about 32°50' South latitude with 44 gravity stations.

An equivalent sources technique was used to compute bidimensional geoid undulations using free-air gravity anomaly as input data. Then we have compared these with isostatic compensated geoidal models in both Pratt's and Airy's hypothesis. To confirm these results we have calculated bidimensional simple Bouguer's and pseudoisostatic gravity anomalies too. Both bidimensional results show a gravity excess in this cross-section.

**Keywords:** Geological structure - gravity - geoid - isostasy

## INTRODUCCION

Este trabajo aspira a proporcionar nuevos elementos que contribuyan a la interpretación geofísica de la Sierra Grande de San Luis, localizada al noreste de dicha provincia. Se

obtuvieron así resultados que permiten señalar tentativamente el defecto del espesor de la corteza terrestre y del estado isostático de la sierra.

Dado que se realizó un análisis bidimensional de esta morfoestructura, los resultados

serán considerados preliminares y serán complementados y ajustados una vez realizado el cálculo tridimensional. Sin embargo, se destaca que la utilización de las ondulaciones geóidicas podrá ser válida como complemento de las anomalías gravimétricas en la interpretación geofísica de la estructura geológica.

## AREA DE ESTUDIO

La sección de análisis se extiende aproximadamente entre 32°45' y 32°50' latitud sur y desde 65° hasta 66°30' longitud oeste (Fig. 1). Esta sección atraviesa a la Sierra Grande de San Luis. Esta Sierra pertenece a la unidad definida por Stelzner (Ramos, 1999) denominada 'Sierras Pampeanas'. Tal como expresa Ramos (1999) esta unidad "comprende una serie de sierras formadas por esquistos cristalinos o metamórficos que emergieron de las pampas circundantes. Actualmente esta unidad se divide en dos provincias de características diferentes, las Sierras Pampeanas Occidentales y las Sierras Pampeanas Orientales". Mientras el sector oriental de la Sierra de San Luis forma parte de la provincia geológica de las Sierras Pampeanas Orientales, el sector occidental pertenece a las Sierras Pampeanas Occidentales.

Durante la Orogenia Andina esta Sierra se elevó a través de fallas inversas submeridianas ubicadas en su borde occidental (Costa-Cortés, 1993) y su geología comprende un basamento que está compuesto de rocas metamórficas, cuerpos ígneos y complejos ultramáficos (Costa, 1987).

## DATOS EMPLEADOS

Los datos provienen tanto del Instituto Geográfico Militar (IGM) como del Instituto de Física Rosario (IFIR).

Se emplearon también los datos gravimétricos y altimétricos relevados a principio de

1997 por el Grupo de Geofísica del IFIR con la colaboración de las Universidades Nacionales de San Juan y San Luis (Ramé-Introcaso, 1997). Se desea destacar que estos últimos valores relevados en 1997 corresponden a un proyecto de investigación en desarrollo por el doctorando G. Ramé y distinto de este estudio.

## CALCULOS EFECTUADOS

Tal como fuera expresado anteriormente, fueron calculadas las ondulaciones bidimensionales del geode y las anomalías pseudo-isostáticas como 'modelo' de validación. A continuación describiremos las expresiones utilizadas.

### Gravedad. Anomalías

Los valores de gravedad están referidos al IGSN 71 (International Gravity Standardization Net 1971). Para el cálculo de las ondulaciones geóidicas se emplearon como dato de entrada las anomalías de aire libre observadas obtenidas mediante las expresiones siguientes:

(1) Anomalía de aire libre 'observada'

$$AAL = g_{Obs.} - (\gamma_{(1984)} - 0.3086 \cdot H [m]) \quad (1)$$

Siendo:

$g_{Obs.}$  = gravedad observada [mGal]

$\gamma_{(1984)}$  = expresión de la gravedad normal propuesta por el Sistema Geodésico Mundial en 1984 que incluye el efecto de la atmósfera [mGal]

$0.3086 \cdot H$  = corrección por altura calculada con el gradiente normal de gravedad (0.3086 mGal/m) y  $H$  [m], altura sobre el nivel medio del mar

(2) Anomalía de aire libre calculada a partir de un modelo compensado

$$AAL = g_{VTop.} - g_{VRaiz.} \quad (2)$$

Siendo:

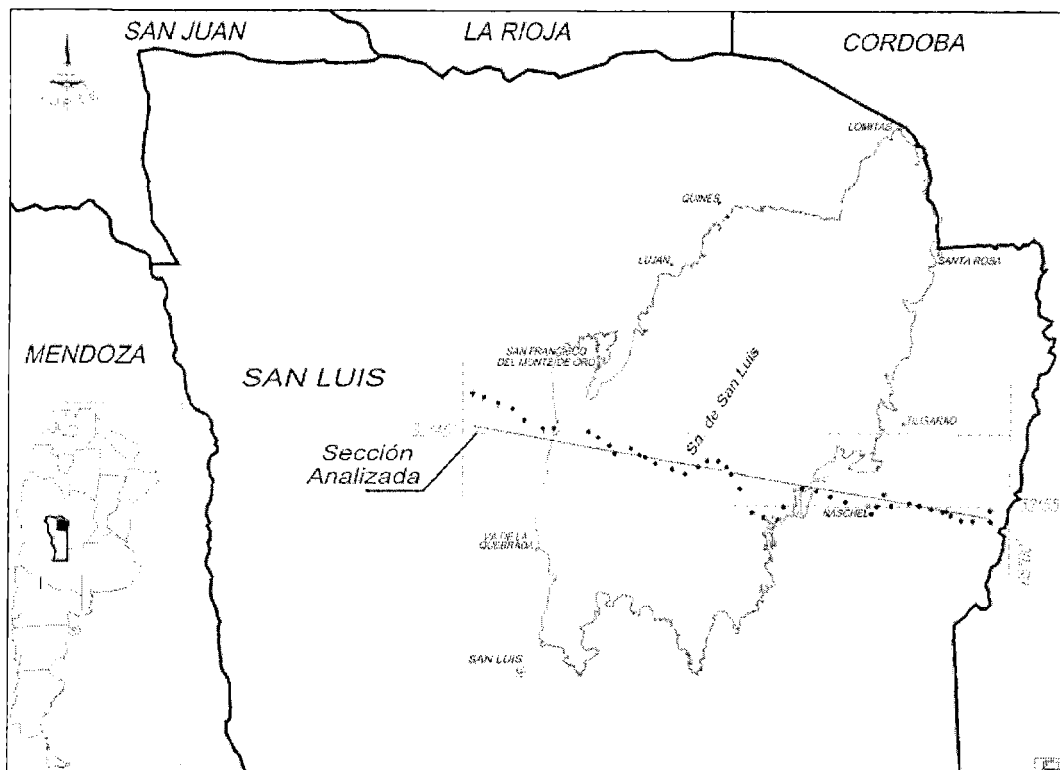


Figura 1. Ubicación geográfica de la sección analizada.

$g_{Vtop}$ : Efecto gravimétrico vertical de la masa topográfica obtenido a lo largo del relieve de la sección.

$g_{Vraíz}$ : Efecto gravimétrico vertical de la masa de la raíz cortical compensada para los mismos puntos del relieve.

Siguiendo la metodología tradicional, es decir, empleando las anomalías de Bouguer, las expresiones empleadas son las que a continuación se detallan:

Anomalía simple de Bouguer:

$$AB = AAL - (0.1118 \cdot H [m]) \quad (3)$$

Anomalía pseudoisostática, denominada así por su carácter bidimensional

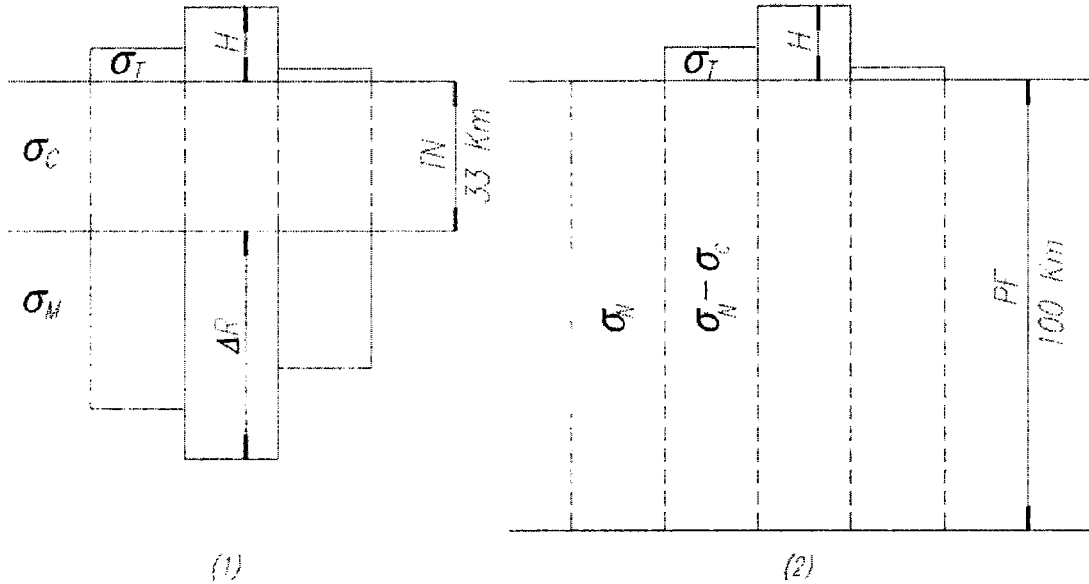
$$AI = AB + CI \quad (4)$$

Siendo:

CI: Corrección isostática (sujeta al modelo de compensación elegido)

Se asumieron dos hipótesis isostáticas: Pratt y Airy (Fig. 2). Siguiendo a Introcaso (1997) entre muchos otros, la hipótesis de Pratt considera una superficie de compensación a una profundidad constante sobre la cual las masas que están sobre ella son iguales, por lo tanto para obtener tal igualdad la densidad deberá variar con la altura. En cambio, en la hipótesis de Airy se mantiene la densidad cortical invariable y se modifican las profundidades en función de las altitudes de los bloques topográficos emergentes, de manera que los mismos se mantengan en equilibrio hidrostático.

En consecuencia, en la hipótesis de Pratt se calculan las densidades de compensación y en la de Airy, las raíces compensadoras.



**Figura 2.** Modelos de compensación en la hipótesis de Airy (1) y Pratt (2) (Fuente: Turcotte and Schubert, 1982).

(1) Hipótesis de Airy.

Usualmente se utiliza la expresión:

$$\Delta R = \frac{\sigma_T}{\sigma_C - \sigma_M} \cdot H \quad (5)$$

Siendo:

$\Delta R$ : Raíz continental [km]

$\sigma_T$ : Densidad de la masa topográfica que emerge por sobre el nivel medio del mar (NMM) ( 2,67 g/cm<sup>3</sup>)

$\sigma_C$ : Densidad de la corteza por debajo del NMM ( 2,90 g/cm<sup>3</sup>)

$\sigma_M$ : Densidad del manto superior ( 3.30 g/cm<sup>3</sup>)

H: Altura sobre el nivel medio del mar [km]

El espesor de la corteza  $T_N$  se asume igual a 33 km. (Wollard 1969, Introcaso *et al.* 1992)

(2) Hipótesis de Pratt

En este modelo se calculan las densidades de compensación ( $\sigma_c$ ) de cada uno de los bloques considerados, utilizando:

$$\sigma_c = \frac{H}{PF} \cdot \sigma_T \quad (6)$$

Siendo:

H: Altura sobre el nivel medio del mar [km]

PF: Profundidad de compensación (asumida igual a 100 km como es usual)

$\sigma_T$ : Densidad de la masa topográfica que emerge por sobre el NMM (2,67 g/cm<sup>3</sup>)

Notemos que  $\sigma_c$  es el déficit de densidad que compensa en cada columna los excesos de masa por sobre el nivel del mar.

### ONDULACION GEOIDAL CON FUENTES EQUIVALENTES

El valor de la ondulación geoidal “observada o real” se obtuvo siguiendo el método propuesto por Cordell (1992), que se identificará como de ‘fuentes equivalentes’ (F.Eq.). El proceso aplicado se basa en colocar, por debajo de cada uno de los puntos estación que cuenta con un valor observado de anomalía, una fuente a una profundidad que se obtiene de manera proporcional (aplicando un determinado factor) a la distancia del punto estación más cercano al considerado. El valor de esta fuente será aquél que obtenga un e-

fecto que iguale al valor máximo observado de anomalía. Así, el cálculo se desarrolla iterativamente hasta obtener un conjunto de fuentes capaces de reproducir los valores reales observados de las anomalías de aire libre dentro de un valor máximo de error, tolerancia, que se especifica previamente a iniciar el proceso (Introcaso *et al.*, 2002).

Una vez obtenidas las fuentes equivalentes, es posible calcular el potencial perturbador  $T_i$  en cada estación de la sección aquí analizada utilizando la sumatoria de los efectos de las fuentes puntuales. Desde aquí el cálculo de las ondulaciones  $N_i$  es inmediato. En efecto, a partir de la fórmula de Bruns:

$$N_i = \frac{T_i}{\gamma} \quad (7)$$

con  $\gamma$ : gravedad media (980 Gals)

El cálculo se efectuó basándose en un programa utilizado también por Guspí *et al.*, 2004.

Este trabajo emplea tres anomalías de aire libre: (a) 'observadas', es decir, las que surgen de la ec. (1); (b) las que surgen de un modelo compensado en la hipótesis de Airy, ec. (2) y (5) y, (c) las que surgen de un modelo compensado en la hipótesis de Pratt, ec. (4.2) y (4.6).

En un primer paso se analizó la respuesta del método de fuentes equivalentes modificando los parámetros de cálculo. En efecto, debido a la ambigüedad en la distribución de masas causantes se emplearon distintos factores de profundidad y distintas tolerancias.

Inspirados en la propuesta de Cordell (1992) se efectuaron dos series de cálculos: Primera serie: Tolerancia igual a 0,1 mGal. Segunda serie: Tolerancia igual a 1 mGal; y en ambas, se emplearon tres factores de profundidad (en adelante FP): 1,4; 2 y 3.

La Figura 3 muestra las respuestas en función de los parámetros antes detallados. Los valores numéricos obtenidos se muestran en Tabla 1. La misma contiene valores en tres estaciones seleccionadas (A, B, C), de acuerdo con:

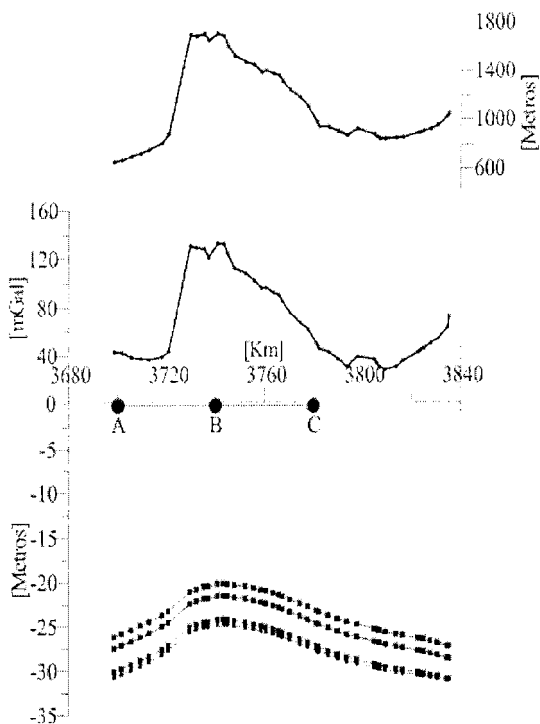
Columnas 1 y 2: valores topográficos observados.

Columna 3: valores de anomalías de aire libre 'observadas'.

Columnas 4 a 9: valores geoidales por el método de fuentes equivalentes.

En las mismas columnas pueden observarse las diferencias, en valor absoluto, entre los valores enumerados.

En los casos detallados, tanto la figura como las diferencias numéricas de la Tabla 1, evidencian que la morfología resulta invariante entre los diferentes FP elegidos, aunque con una determinada tolerancia, puede apreciarse que ciertos FP no permiten respetar el máximo error predeterminado; se destaca que los



**Figura 3.** Respuestas del método de fuentes equivalentes modificando parámetros de cálculo. Referencias:

- Eje superior: Topografía
- Eje del medio: Anom. Aire Libre
- Eje inferior: Ondulaciones obtenidas a partir de las series de cálculo.

valores numéricos derivados son negativos; esto evidencia la necesidad de anclar los resultados.

La Figura 3 muestra en los ejes superior y medio, la topografía y las anomalías de aire libre. Mientras que en el eje inferior, se exhiben las ondulaciones resultantes de acuerdo con las series de cálculos ya detalladas.

## RESULTADOS

### 1. Valores empleados

Una vez calculadas las anomalías de aire libre y Bouguer (Fig. 4 a), las mismas fueron regularizadas empleando el método de La Porte (Baranov, 1975) de manera de disponer de un valor cada 5 km de separación (Fig. 4 b).

### 2. Anomalías pseudoisostáticas

Estas anomalías fueron calculadas de acuerdo con (4) en base a las expresiones (5) y (6) correspondientes a los modelos de Airy y Pratt (Fig. 2).

La Figura 5 a muestra los modelos corticales de Airy y Pratt asumidos, mientras la Figura 5 b exhibe los efectos negativos originados por las raíces de Airy y por las columnas litosféricas con déficit de densidades. Ambos modelos están perfectamente compensados. Notemos que los dos efectos negativos calculados (que cambiados de signo corresponden a las correcciones CI de la ec. 4), exceden significativamente a la amplitud de la anomalía de Bouguer observada. (Fig. 5 b). Ello determina que las anomalías pseudoisostáticas (Fig. 5 b, eje del medio) presentan una respuesta positiva.

### 3. Ondulaciones geoidales

De acuerdo con ec. (7) y empleando las anomalías de aire libre observadas en ec. (1) y calculadas ec. (2) en el modelo de Airy (ecuación (5) y Fig. 5 a) y en el modelo de Pratt (ecuación (6) y Fig. 5 a) hemos obtenido las ondulaciones de la Figura 6. Con el fin de comparar las tres ondulaciones, hemos

**Tabla 1.** Valores numéricos de topografía, anomalía de aire libre observada y ondulaciones geoidales por fuentes equivalentes en tres estaciones seleccionadas (A,B,C: Figura 3).

COMPARACIÓN VALORES NUMÉRICOS								
Pto	Cota [m]	AAL [mGal]	N F.Eq. [m]					
			FP: 1.4 Tol: 0.1 ME=-0.1 Iter:=1347	FP: 2.0 Tol: 0.1 ME=-0.1 Iter:=3496	FP: 3.0 Tol: 0.1 ME=0.89 Iter:=10000	FP: 1.4 Tol: 1.0 ME=0.99 Iter:=290	FP: 2.0 Tol: 1.0 ME=0.99 Iter:=707	FP: 3.0 Tol: 1.0 ME=-1.00 Iter:=5959
A	655	43.67	-26.16	-27.55	-26.15	-26.15	-27.44	-30.05
Dif.	1033	86.19	5.38	5.37	5.42	5.40	5.37	5.34
B	1688	129.86	-20.78	-22.18	-25.28	-20.75	-22.07	-27.41
Dif.	739	83.43	2.52	2.61	2.51	2.51	2.61	2.61
C	949	46.43	-23.30	-24.79	-27.79	-23.26	-24.68	-27.32

Referencias:

N F.Eq.: Ondulación mediante Fuentes Equivalentes

FP: Factor de profundidad

ME: Máximo error

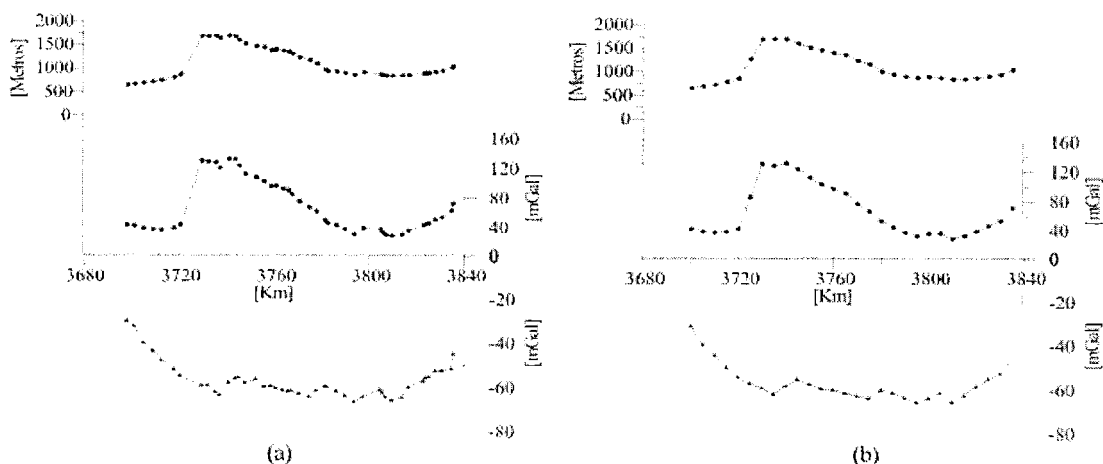
Iter: Iteraciones

AAL: Anom. Aire Libre

Tol: Tolerancia

Dif.: Diferencia

## Exceso de gravedad en la Sierra Grande de San Luis obtenido a partir de ...



**Figura 4.** (a) Valores observados; (b) Valores regularizados por el método de La Porte. (Baranov, 1975)  
Referencias:

En (a): - Arriba: Topografía observada. Valor máx. ~ 1710 m. - Al medio: Anom. Aire Libre. Valor máx. ~ 133.5 mGal. - Abajo: Anomalías de Bouguer Valor máx. ~ 66.3 mGal

En (b): - Arriba: Topografía regularizada. Valor máx. ~ 1702 m.- Al medio: Anom. Aire Libre regularizada. Valor máx. ~ 132 mGal.- Abajo: Anom. de Bouguer regularizada. Valor máx. ~ -65.6 mGal

anclado las tres respuestas a una estación (h-H) conocida. Consistentemente con el exceso de gravedad mostrado en Figura 5 b, abajo, la ondulación del geode observado presenta un claro positivo respecto de la distribución dipolar (+), (-) que corresponde a una corteza compensada.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó una sección que atraviesa de oeste a este a la Sierra Grande de San Luis en aproximadamente  $32^{\circ}50'$  de latitud sur.

Los resultados obtenidos en dos dimensiones, de acuerdo con la gravimetría tradicional, proporcionan anomalías pseudoisostáticas en exceso (raíz cortical en defecto en la hipótesis de Airy y densidades diferenciales litosféricas en exceso en la hipótesis de Pratt) y con relación a las ondulaciones geoidales bidimensionales, puede apreciarse que los valores obtenidos a partir de modelos compensados se encuentran por debajo de los

valores geoidales que surgen a partir de las anomalías de aire libre observadas.

Estos resultados permiten asegurar que las ondulaciones geoidales pueden ser empleadas como complemento o en reemplazo de la gravimetría tradicional para la interpretación geofísica de una morfoestructura.

Sin embargo, es importante destacar y prevenir, que los resultados están limitados por ser consecuencia de cálculos bidimensionales, por lo tanto éstos deben ser complementados y ajustados con cálculos regionales. Además, si bien existe un exceso de gravedad en la Sierra, aún no puede inferirse la existencia o no de equilibrio isostático dado que la isostasia es operativa y manifiesta para áreas mayores de 100 km.

### REFERENCIAS

- Baranov, W., 1975. Potential fields and their transformations in applied geophysics. Gebrüder Borntraeger. ISBN 3443130089. Berlin-Stuttgart.

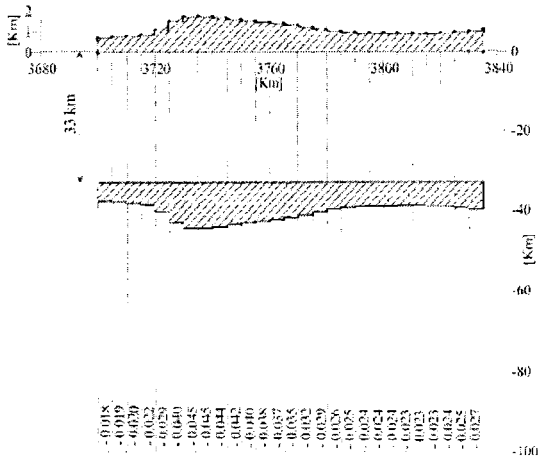


Figura 5 (a). Modelos compensados en las hipótesis de Airy y Pratt.

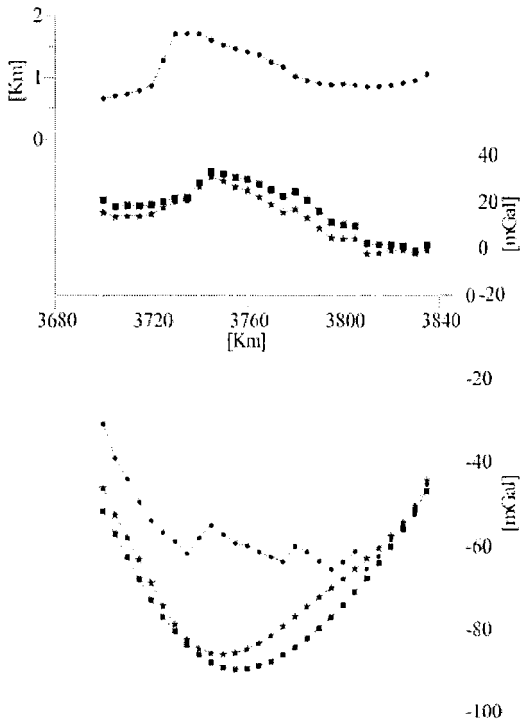


Figura 5 (b). Efectos de las raíces compensadas y anomalías pseudoisostáticas resultantes.

Referencias:  
Eje superior: Topografía. Eje del medio: ■: Anom. Pseudoisostática Modelo de Airy. †: Anom. Pseudoisostática Modelo de Pratt. Eje inferior: ●: Anom. de Bouguer observada regularizada. ■: Efecto Modelo de Airy. †: Efecto Modelo de Pratt.

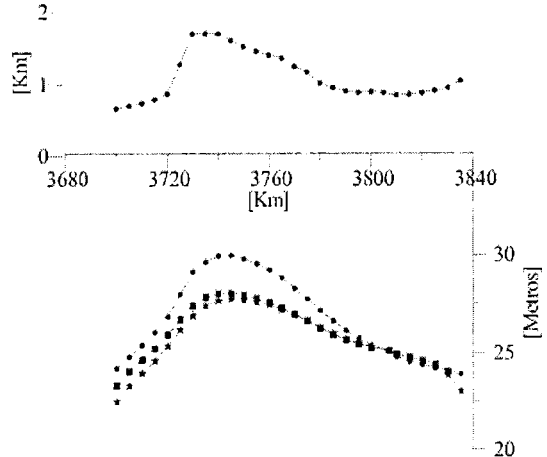


Figura 6. Valores de cota y ondulaciones geoidales obtenidos con fuentes equivalentes.

Referencias:

Eje superior: Topografía. Eje inferior: ●: Ondulac. geoidal 'observada'. ■: Ondulac. geoidal Modelo de Airy. †: Ondulac. geoidal Modelo de Pratt.

Cordell, L. 1992. A scattered equivalent-source method for interpolation and gridding of potential-field data in three dimensions. *Geophysics*, 57: 629-636.

Costa, C., 1987. Neotectónica de la Sierra Grande de San Luis. *Actas X Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán*. I:255-258.

Costa, C. y J. Cortés, 1993. Tectónica extensional en el extremo sur de la Sierra de San Luis. *Actas XII Congreso Geológico Arg. y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*. III:113-118.

Guspí, F., A. Introcaso y B. Introcaso, 2004. Gravity-enhanced representation of measured geoid undulations using equivalent sources. *Geophysical Journal International* 158:1-8. En prensa.

Introcaso, A., M.C. Pacino and H. Fraga. 1992. Gravity, isostasy and andean crustal shortening between latitudes 30° and 35°S. *Tectonophysics*, 205:31-48.

Introcaso, A., 1997. *Gravimetría*. UNR Editora. 355pp.

Introcaso, A., F. Guspí y B. Introcaso, 2002. Interpretación del estado isostático de la Cuenca del Salado (Provincia de Buenos Aires) utilizando un geode local obtenido mediante fuentes equivalentes a partir de anomalías de



*Exceso de gravedad en la Sierra Grande de San Luis obtenido a partir de ...*

- aire libre. Actas del XV Congreso Geológico Argentino [Artículo]. Publicación digital. Calafate, Argentina.
- Ramé, G. y A. Introcaso, 1997. Análisis isostático preliminar de la Sierra Grande de San Luis, Argentina. 19a. Reunión Científica AAGG-Primeras Jornadas de Catastro Minero. San Juan.
- Ramos, V., 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En 'Geología Argentina'. Anales 29, 3: 41-93. Servicio Geológico y Minero Argentino.
- Turcotte, D. and G. Schubert, 1982. Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems. John Wiley & Sons Inc. 450 pp.
- Woollard, G.P., 1969. Regional variations in gravity. The earth's crust and upper mantle. Ed. Pembroke J.Hart, 320-341.