

# ANÁLISIS CORTICAL DE LA CUENCA GOLFO DE SAN JORGE UTILIZANDO ANOMALÍAS DE BOUGUER Y ONDULACIONES DEL GEOIDE

Laura L. CORNAGLIA<sup>1,2</sup>, Francisco RUIZ<sup>1,2</sup> y Antonio INTROCASO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geofísico Sismológico Volponi, Universidad Nacional de San Juan - CONICET - Grupo de Geofísica

<sup>2</sup> IFIR, Universidad Nacional de Rosario - CONICET. Emails: cornagli@fceia.unr.edu.ar, fruiz@unsj-cuim.edu.ar, geofisic@fceia.unr.edu.ar

## RESUMEN

Con la finalidad de evaluar características tales como tipo de corteza y estado isostático de la cuenca sedimentaria del Golfo de San Jorge, analizamos los valores observados de anomalías de Bouguer y de ondulaciones geoidales calculadas desde anomalías de aire libre por el método de fuentes equivalentes, comparándolos con las respuestas de un modelo de cuenca compensado hidrostáticamente determinado a partir de la masa topográfica de la zona y el relleno sedimentario de la cuenca. Por ambos caminos encontramos un exceso de masas que interpretamos como significativa antirraíz cortical y predice subsidencia para el futuro. Otras alternativas como por ejemplo la intrusión de densas masas intracorticales, no alteran las conclusiones.

Palabras clave: *Cuenca, Anomalías, Gravedad, Ondulación, Geoide, Isostasia.*

**ABSTRACT:** *Crustal analysis of the San Jorge Basin based on Bouguer anomalies and geoid undulations.* To evaluate crustal characteristics such as crust type and isostatic balance of the sedimentary San Jorge Gulf Basin, we analyzed observed Bouguer anomalies and geoid undulations calculated from free-air anomalies and equivalent sources, comparing them with the responses of a hydrostatic compensated basin model prepared using the topographic mass of the area and the basin sedimentary fill. In both cases we found an excess mass that we explained as a significant crustal anti-root that predicts subsidence in the future. Others alternatives as for example the emplacement of dense intracrustal masses, do not modified the conclusions.

Keywords: *Basin, Anomalies, Gravity, Geoid, Undulations, Isostasy.*

## INTRODUCCIÓN

La cuenca sedimentaria del Golfo de San Jorge se localiza en la Patagonia, como parte de las provincias de Chubut y Santa Cruz. Se extiende sobre el mar epicontinental argentino y adquiere gran importancia económica por sus reservorios de petróleo; es de gran extensión superficial, estimándose su área en 170.000 km<sup>2</sup> (Fig. 1). Martín (1954) fue el primero en destacar un máximo gravimétrico sobre la mayor potencia sedimentaria, explicando sin cuantificar que correspondía a un ajuste isostático imperfecto. Cesanelli y Lesta (1973) presentaron para la corteza superior sobre el meridiano 68°O y el paralelo 46°S, perfiles de reflexión y refracción sísmica, de gravedad y magnetismo, realizando una correlación del análisis geofísico con datos geológicos superficiales y subsuperficiales. Introcaso (1980) empleando dos secciones perpendiculares que

atravesaban la cuenca, analizó los resultados gravimétricos continentales encontrando sobre el potente desarrollo sedimentario, nuevamente un máximo gravimétrico que aumentaba de forma considerable su valor al ser corregido por el efecto de los sedimentos. Analizando estas anomalías gravimétricas pudo inferir que "el techo de la masa anómala estaría dentro de la primera mitad de la corteza". Luego Introcaso *et al.* (1986) prepararon modelos geofísicos a partir de las anomalías de Bouguer corregidas por efectos de cortas longitudes de onda y del relleno sedimentario. La anomalía corregida encontrada, exhibió un positivo que fue asociado con atenuación cortical; a partir de estas respuestas gravimétricas se realizó una inversión encontrándose una antirraíz mayor a la esperada para un modelo compensado, indicando sobrecompensación isostática. Nuestro estudio involucra nuevos datos de gravedad y altimetría proveniente del

modelo digital de elevación de terreno Etopo2. En el marco de la metodología tradicional, la gravedad observada fue comparada con valores gravitatorios teóricos correspondientes a un modelo de cuenca perfectamente compensado hidrostáticamente. Este modelo se determinó a partir de la geometría y relleno sedimentario de la cuenca y de la topografía de la zona. Centrando nuestra atención sobre el sector de mayor potencia sedimentaria, obtuvimos de la comparación realizada residuos positivos que no concuerdan con la respuesta gravitatoria esperable para el modelo asumido. Por el otro lado y desde una óptica moderna, calculamos valores de ondulación geoidal N a partir de anomalías de aire libre y la utilización de fuentes equivalentes. Estos valores provenientes de la observación de fueron cotejados con las ondulaciones teóricas del modelo. El resultado de esta nueva comparación exhibió también di-

ferencias positivas. Así, a partir de lo obtenido por ambos caminos, inferimos una corteza sobrecompensada cuya interpretación isostática indica movi­lismo descendente para restablecer el equilibrio.

## LA CUENCA SEDIMENTARIA DEL GOLFO DE SAN JORGE

Strelkov *et al.* (2005) clasificaron a la cuenca sedimentaria del Golfo de San Jorge como de tipo intracratónica de génesis extensiva, desarrollada sobre una corteza eopaleozoica. Esta cuenca, de forma alargada en la dirección este-oeste, se desarrolla desde la faja plegada andina al oeste, y hasta el alto estructural al este en la plataforma del mar argentino, alojándose entre los macizos de Somuncura o Norpatagónico al norte y del Deseado al sur; la porción principal de la cuenca, al este de la sierra de San Bernardo, suele dividirse comúnmente en flanco norte, centro de la cuenca, flanco sur y zonas costa afuera (Baldi y Nevistic 1996, Sylwan 2001) (Fig. 2).

El origen de esta cuenca de acuerdo a Strelkov *et al.* (2005), se vincula con "una extensión litosférica generalizada desarrollada desde el Triásico en todo el margen oeste de Gondwana". La historia geológica de la cuenca según Baldi y Nevistic (1996) se divide en cuatro estadios: (i) rift temprano, caracterizado por dos sucesos, el primero durante el Triásico Superior y Jurásico Inferior, anterior al desglose de Gondwana formándose una "serie de grábenes y hemigrábenes de gran extensión y baja integración" y el segundo, de subsidencia con la actividad volcánica; (ii) rift tardío, durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior, presentando una disminución en la actividad del fallamiento normal de manera que la cuenca muestra una progresiva integración debido a la gradual colmatación de las subcuencas vinculadas al rift temprano; (iii), hundimiento térmico temprano y por último (iv), hundimiento térmico tardío, desarrollado desde el Aptiano (Cretácico) hasta el Paleoceno (Terciario



Figura 1: Cuenca sedimentaria del Golfo de San Jorge. La figura muestra sólo las isóbatas de basamento de profundidades 3 y 6 km.

Inferior), ocasionando una subsidencia continua aunque de menor grado respecto al estadio anterior. Como consecuencia de la variación en el grado de deriva de la placa Sudamericana hacia el oeste, la cuenca "estuvo sujeta a eventos tectónicos compresionales y extensionales".

La estratigrafía de esta cuenca puede encontrarse en diversos trabajos; uno muy pormenorizado corresponde a Lesta *et al.* (1980). Diversos trabajos (Lesta *et al.* 1980, Introcaso 1980, Baldi y Nevistic 1996 y Strelkov *et al.* 2005) señalan que la columna estratigráfica comprende sedimentos jurásicos, cretácicos y terciarios, alcanzando hasta el Oligoceno a Mioceno. El paquete sedimentario tiene una profundidad de alrededor de 7.000 m en el centro de la cuenca (Baldi y Nevistic 1996).

## DATOS UTILIZADOS

La base de datos que se ha utilizado en este trabajo involucra las isóbatas de basamento de la cuenca, anomalías gravimétricas de aire libre [ $^{AAL}$ ] y Bouguer [ $^{AB}$ ] y altimetría proveniente del modelo digital de elevación de terreno Etopo2.

La geometría de la cuenca se conformó a partir de las isóbatas de basamento que fueron extraídas de mapas tectónicos (pa-

ra la zona continental, escala 1: 5.000.000), y geológicos (para la zona marina, escala 1: 5.000.000). Las curvas del sector oceánico provinieron del mapa geológico de la República Argentina (SEGEMAR 1996), mientras que las isóbatas del sector continental se extrajeron del Mapa Tectónico de América del Sur (Almeida *et al.* 1978). Una vez digitalizadas estas isóbatas, se procedió a su integración y posterior regularización con el fin de utilizarlas en el desarrollo de este trabajo que centró su estudio en el sector de mayor potencia sedimentaria continental de la cuenca.

La carta de anomalías de  $^{AAL}$  (sector oceánico) y  $^{AB}$  (sector continental) (Fig. 3) utilizada en este trabajo, fue elaborada a partir de la base de datos procesada por Green y Fairhead (1991). Los valores gravitatorios están referidos al sistema *International Gravity Standardization Net 1971* (IGSN71). Los valores de las anomalías  $^{AB}$  fueron obtenidos aplicando el valor de densidad media del granito (Torge 2001, entre otros) para la placa de Bouguer y correcciones de terreno. Cabe señalar que con la utilización de esta carta pudimos optimizar el procesamiento de los datos gravimétricos a través de la aplicación de expresiones de cálculo tridimensionales, a diferencia de lo realizado en trabajos

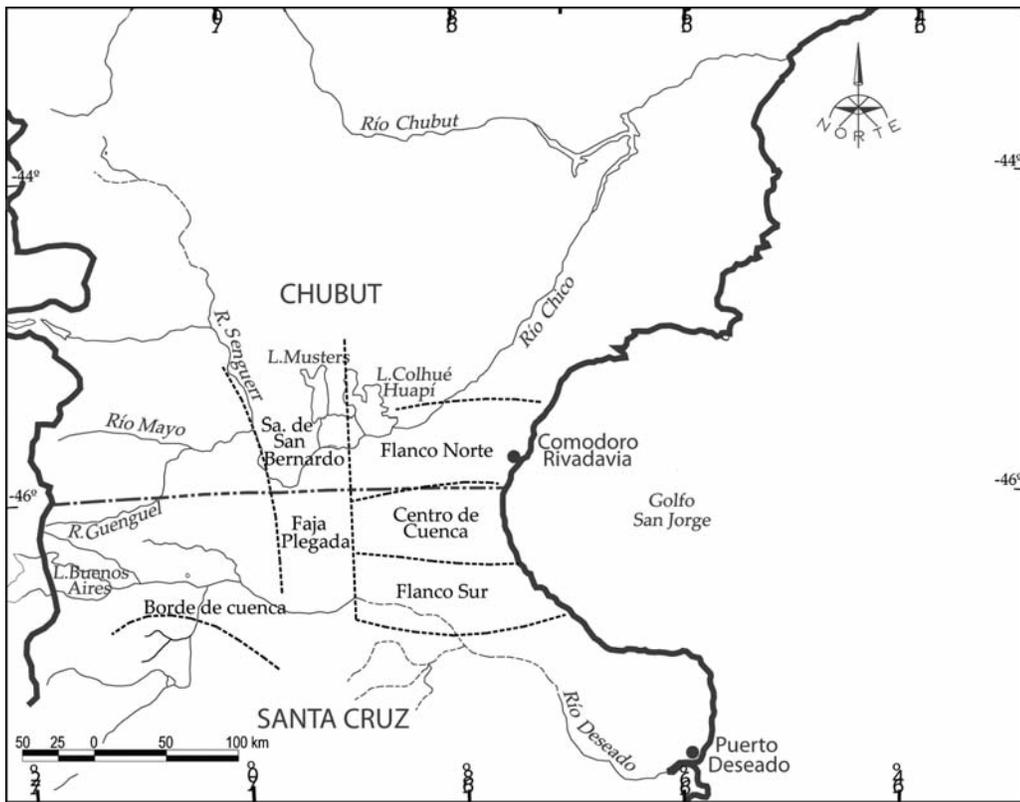


Figura 2: División de la porción principal de la cuenca del Golfo San Jorge. (Modificado de Homocv *et al.* 1993).

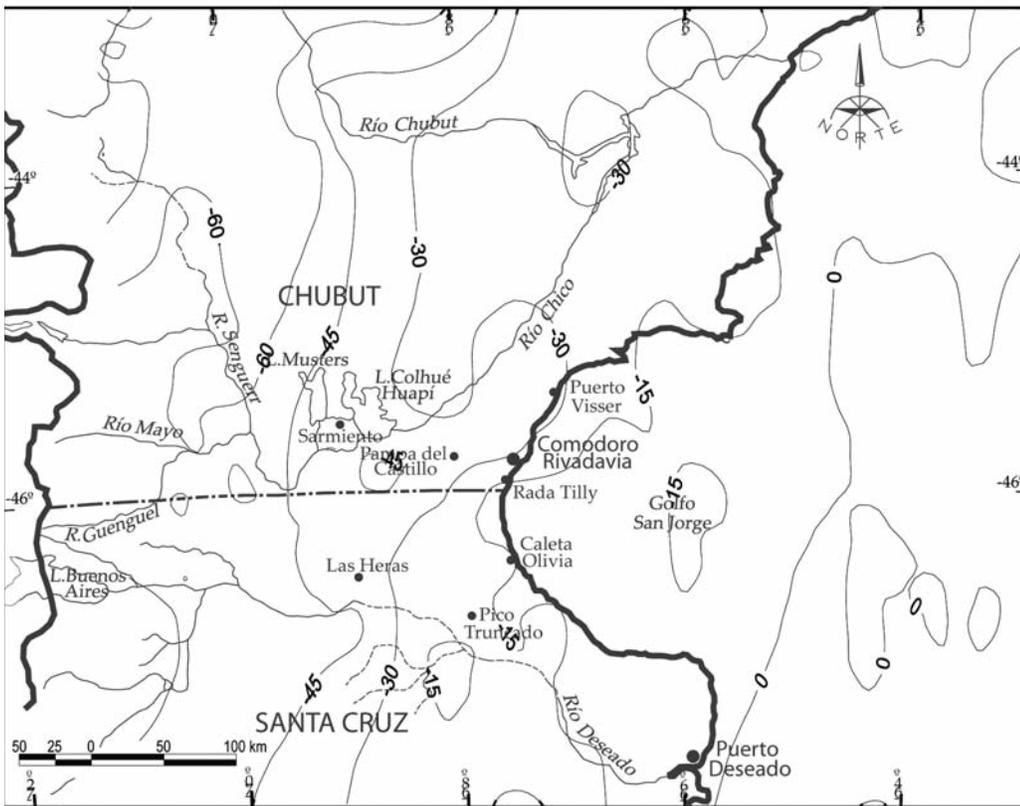


Figura 3: Carta de isoanómalas de AAL (sector oceánico) y AB (sector continental). Equidistancia 15 mGal.

anteriores en donde los datos se distribuían sobre secciones que atravesaban la

cuenca; además éstos no contemplaron correcciones de terreno ni referencia a mar-

cos gravitatorios y geodésicos actuales. La altimetría, para nada despreciable, fue

tomada en consideración; así se utilizaron los valores altimétricos del modelo digital de elevación de terreno Etopo2 (*National Geophysical Data Center NGCD, Etopo2: Bathymetry/Topography Data, US department of Commerce, Washington DC 2001*) (Fig. 4) desarrollado en una serie de coeficientes armónicos esféricos hasta grado y orden 360 (Fürste *et al.* 2007) y disponible en la web: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>, que corresponde al *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM), uno de los seis centros del *International Gravity Field Service* (IGFS) de la *International Association of Geodesy* (IAG).

**MODELO TEÓRICO O DE COMPARACIÓN**

La evaluación isostática exige construir un modelo de comparación perfectamente compensado. El modelo elegido fue calculado asumiendo una corteza inicialmente distensiva (Strelkov *et al.* 2005), sometida luego a pulsos de compresión menor tal como lo indica la topografía; compresión regional asociada con la orogenia andina (Baldi y Nevistic 1996).

Con la topografía y el relleno sedimentario conocidos se calcularon los espesores de la antirraíz compensadora a partir de ecuaciones (tanto para el sector continental como oceánico de la cuenca) que igualan presiones a 33 km de profundidad (espesor del Moho o base de una corteza estandarizada) (Fig. 5).

(a) Sector continental:

$$H_T \cdot \sigma_T + H_S \cdot \sigma_S + (T_N - [H_S + X]) \cdot \sigma_C + X \cdot \sigma_{M.S.} = T_N \cdot \sigma_C \quad (1)$$

(b) Sector oceánico:

$$H_A \cdot \sigma_A + (H_S - H_A) \cdot \sigma_S + (T_N - [H_S + X]) \cdot \sigma_C + X \cdot \sigma_{M.S.} = T_N \cdot \sigma_C \quad (2)$$

Donde  $\sigma_T$  es la densidad de la masa topográfica,  $\sigma_S$  es la densidad de los sedimentos,  $\sigma_C$  es la densidad de la corteza,  $\sigma_{M.S.}$  es la densidad del manto superior,  $\sigma_A$  es la densidad del agua,  $H_T$  es la altura topográfica,  $H_S$  es la profundidad de las isóbatas de basamento de la cuenca (relleno

sedimentario),  $H_A$  es la profundidad del fondo oceánico (batimetría),  $T_N$  es el espesor 'normal' asumido para la corteza, y  $X$  es el espesor de la antirraíz compensadora. Despejando la incógnita  $X$  resulta:

$$X = \frac{1}{\sigma_{M.S.} - \sigma_C} \cdot ([\sigma_C - \sigma_S] \cdot H_S - \sigma_T \cdot H_T) \quad (3)$$

(b) Sector oceánico:

$$X = \frac{1}{(\sigma_{M.S.} - \sigma_C)} \cdot ([\sigma_C - \sigma_S] \cdot H_S + [\sigma_S - \sigma_A] \cdot H_A) \quad (4)$$

Con el fin de cuantificar las expresiones (3) y (4) hemos considerado: (a) Introcaso *et al.* (1986), utilizaron los valores de velocidades de sísmica de refracción del trabajo de Cesanelli y Lesta (1973) y aplicaron las relaciones de Nafe y Drake (1957) para calcular a partir de ellas la densidad del relleno sedimentario; el valor que obtuvieron fue el que adoptamos para este trabajo, es decir,  $\sigma_S = 2,32 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$ ; (b) respecto a  $\sigma_C$  y  $\sigma_{M.S.}$ , aceptamos que sus valores promedio están entre  $(2,84 - 2,93) \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  y  $3,32 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  respectivamente y asumimos  $\sigma_C = 2,90 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  y  $\sigma_{M.S.} = 3,30 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  (Introcaso 1997); (c) para  $\sigma_A$  y  $\sigma_T$  acordamos en utilizar  $\sigma_A = 1,03 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  (valor usual, Torge 2001, entre otros), y  $\sigma_T = 2,70 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$  (valor medio asumido para el granito, Torge 2001, entre otros) y (d), la corteza 'normal'  $T_N = 33 \text{ km}$  (Bullen 1963).

Este modelo asumido para la cuenca establece un perfecto estado de compensación entre las masas anómalas topográficas y sedimentarias versus el espesor de la antirraíz.

Una vez asignados los valores numéricos de los parámetros en las ecuaciones (3) y (4) resulta:

$$X = \left[ \frac{1}{0,4} \cdot (0,58 \cdot H_S - 2,70 \cdot H_T) \right] \text{Km} \quad (5)$$

$$X = \left[ \frac{1}{0,4} \cdot (0,58 \cdot H_S + 1,29 \cdot H_A) \right] \text{Km} \quad (6)$$

**EFFECTOS GRAVITATORIOS Y POTENCIALES TEÓRICOS O DE COMPARACIÓN**

Obtenidas las profundidades  $x$  (Fig. 6),

procedimos a calcular los efectos gravitatorios y potenciales del modelo. Para ello, se aplicaron fórmulas exactas tridimensionales una vez que las masas anómalas fueran aproximadas por un conjunto de paralelepípedos rectos homogéneos. Las expresiones de cálculo utilizadas para la gravedad y potencial gravitatorio fueron presentadas por Okabe (1979) y Guspí (1999) respectivamente, resultando para un punto  $Q(x, y, z)$  (Introcaso y Crovetto 2005):

$$g_z(x, y, z) = G \cdot \sigma' \left\| \left\| x \cdot \ln(y+r) + y \cdot \ln(x+r) + 2x \cdot \arctan \frac{x+y+r}{z} \right\| \right\|_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \left\| \right\|_{\Delta y_1}^{\Delta y_2} \left\| \right\|_{\Delta z_1}^{\Delta z_2} \quad (7)$$

$$T(x, y, z) = G \cdot \sigma' \left\| \left\| xy \cdot \ln(z+r) + xz \cdot \ln(y+r) + yz \cdot \ln(x+r) + x^2 \arctan \left[ \frac{y+z+r}{x} \right] + y^2 \arctan \left[ \frac{x+z+r}{y} \right] + z^2 \arctan \left[ \frac{x+y+r}{x} \right] \right\| \right\|_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} \left\| \right\|_{\Delta y_1}^{\Delta y_2} \left\| \right\|_{\Delta z_1}^{\Delta z_2} \quad (8)$$

Donde  $g_z(x, y, z)$  es la componente vertical de gravedad en el punto  $Q(x, y, z)$ ;  $T(x, y, z)$  es el potencial gravitatorio anómalo en el punto  $Q(x, y, z)$ ;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  son las diferencias entre las caras del paralelepípedo ( $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ ) y las coordenadas del punto  $Q(x, y, z)$  con  $i=1,2$ ;  $r = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$  es la distancia entre el punto  $Q(x, y, z)$  y cada uno de los vértices del paralelepípedo;  $G$  es la constante de gravitación universal:  $G = 6.67 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $\sigma'$  es la densidad de la masa del paralelepípedo. Una vez obtenido  $T(x, y, z)$ , la ondulación teórica o de comparación del geode  $N(x, y)$  se obtuvo aplicando la fórmula de Bruns (Heiskanen y Moritz 1985, entre otros):

$$N(x, y) = \frac{T(x, y, z=0)}{\gamma} \quad (9)$$

Siendo  $\gamma$  la gravedad asumida comúnmente igual a 980 Gal.

Los cálculos se efectuaron aplicando el software desarrollado por Crovetto (2006) del Grupo de Geofísica del IFIR [CONICET-UNR].

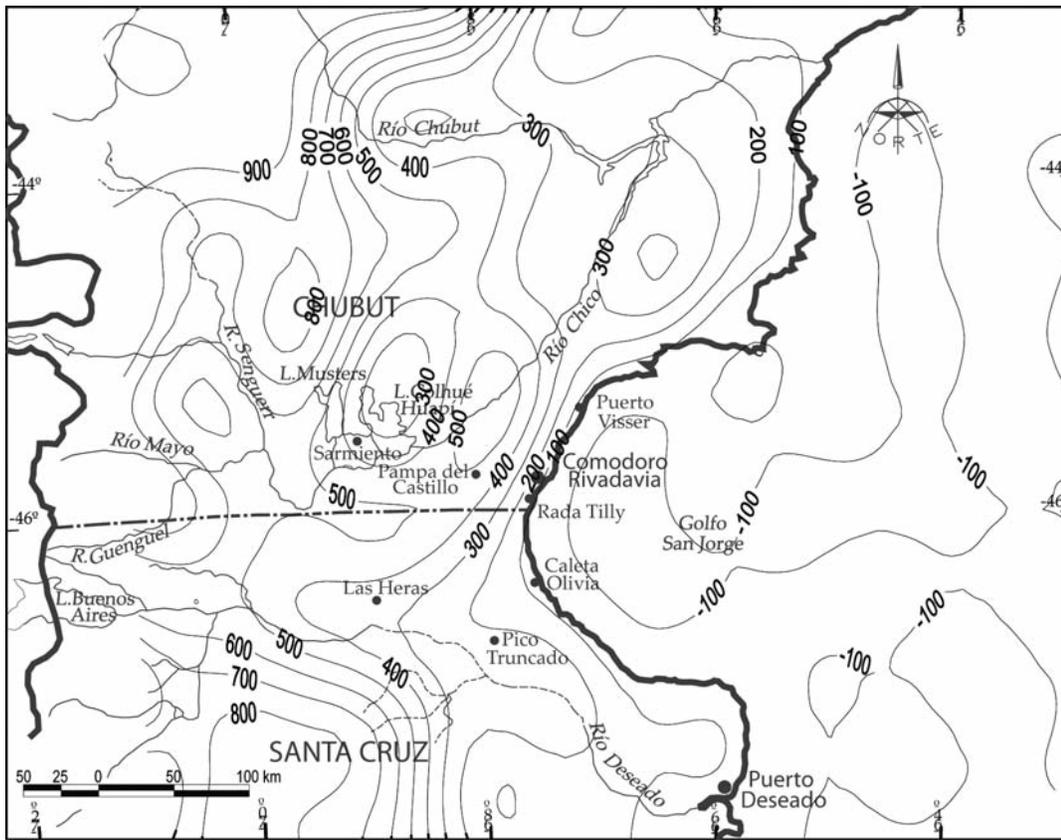


Figura 4: Valores altimétricos del modelo Etopo2. Equidistancia 100 metros.

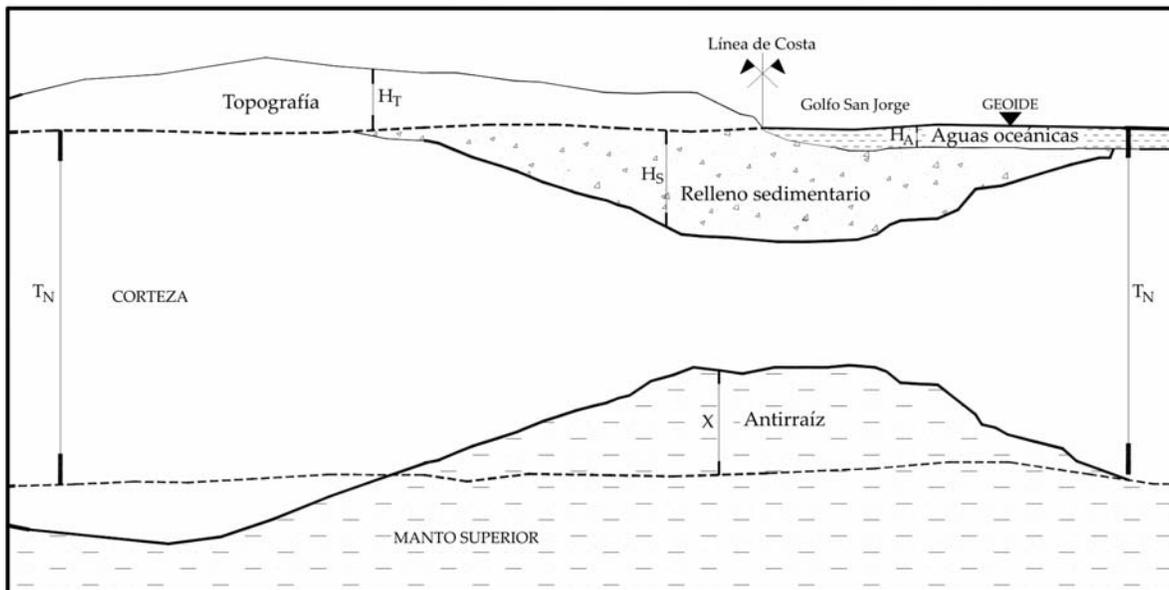


Figura 5: Modelo geofísico esquemático asumido para la cuenca.

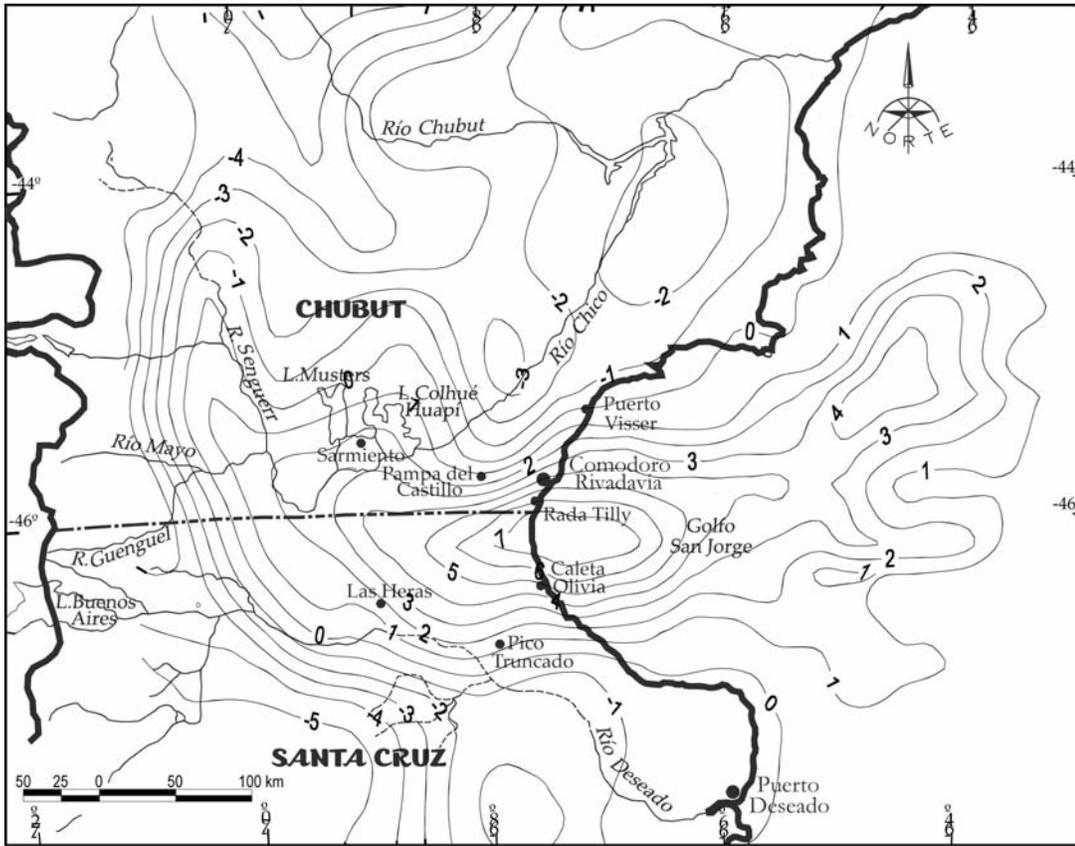
### ANOMALÍAS DE BOUGUER PARA EL ANÁLISIS ISOSTÁTICO

En el marco de la metodología tradicional, el efecto gravitatorio del modelo  $EG_{Teórico}$  representa la suma de los efectos

gravitatorios del relleno sedimentario  $EG_{Sedim.}$  (Fig. 7a), de la capa de agua  $EG_{C.A}$  (Fig. 7b) y de las masas compensadoras  $EG_{M.Comp.}$  (Fig. 7c). Es decir  $EG_{Teórico}$  resulta (Fig. 7d):

$$EG_{Teórico} = EG_{Sedim.} + EG_{C.A} + EG_{M.Comp.} \quad (10)$$

$EG_{Sedim.}$  fue calculado en base a las isóbatas de basamento de Figura 1, asumiendo una densidad de  $\sigma_s = 2,32g \cdot cm^{-3}$  para los sedimentos y una densidad diferencial con corteza:  $-0,58g \cdot cm^{-3}$ .  $EG_{C.A}$  fue calculado asumiendo una densidad del agua  $\sigma_A = 1,03g \cdot cm^{-3}$ , manteniendo el valor  $2,32g \cdot cm^{-3}$



**Figura 6:** Espesores de las antirraíces de las masas compensadoras del modelo asumido para la cuenca [ecuaciones (5) y (6)]. Equidistancia 1 km.

<sup>3</sup> para los sedimentos oceánicos; densidades diferenciales respectivas:  $-1,87g \cdot cm^{-3}$  y  $-0,58g \cdot cm^{-3}$ .  $EG_{M.Comp.}$  fue calculado a partir de los espesores de la antirraíz de Figura 6 con una densidad de  $-3,30g \cdot cm^{-3}$  para manto superior y densidad diferencial con corteza:  $+0,40g \cdot cm^{-3}$ .

### ONDULACIONES DEL GEOIDE N PARA LA EVALUACIÓN ISOSTÁTICA

Desde que el potencial  $T$  (o la ondulación  $N$ ) y la gravedad  $g$  se deducen uno del otro, nada impide intentar analizar el balance isostático a partir de  $N$  (Crovetto *et al.* 2007, Introcaso *et al.* 2002).

También aquí utilizaremos el modelo de comparación perfectamente compensado (véase Fig. 5) aunque ahora desde él calcularemos  $N_{Teórico}$  como suma algebraica del total de efectos anómalos: topografía, sedimentos y antirraíz. En efecto, desde la óptica moderna, la ondulación teórica del modelo  $N_{Teórico}$  implica el

cálculo del potencial gravitatorio de las masas topográficas y con (8) y (9) el  $N_{Topog.}$  (Fig. 8a). Análogamente, calculamos el  $N_{Sedim.}$  (Fig. 8b) y las ondulaciones de las masas compensadoras  $N_{M.Comp.}$  (Fig. 8c). Es decir  $N_{Teórico}$  resulta (Fig. 8d):

$$N_{Teórico} = N_{Topog.} + N_{Sedim.} + N_{M.Comp.} \quad (11)$$

### CÁLCULO DE LAS ONDULACIONES DEL GEOIDE

A partir de las anomalías de Bouguer observadas ABObs (que insistimos contienen correcciones de terreno) (véase Fig. 3), obtuvimos las anomalías de Faye AF (Fig. 9), aplicando la clásica corrección de la placa de Bouguer:

$$AF = AB_{Obs} + CB \quad (12)$$

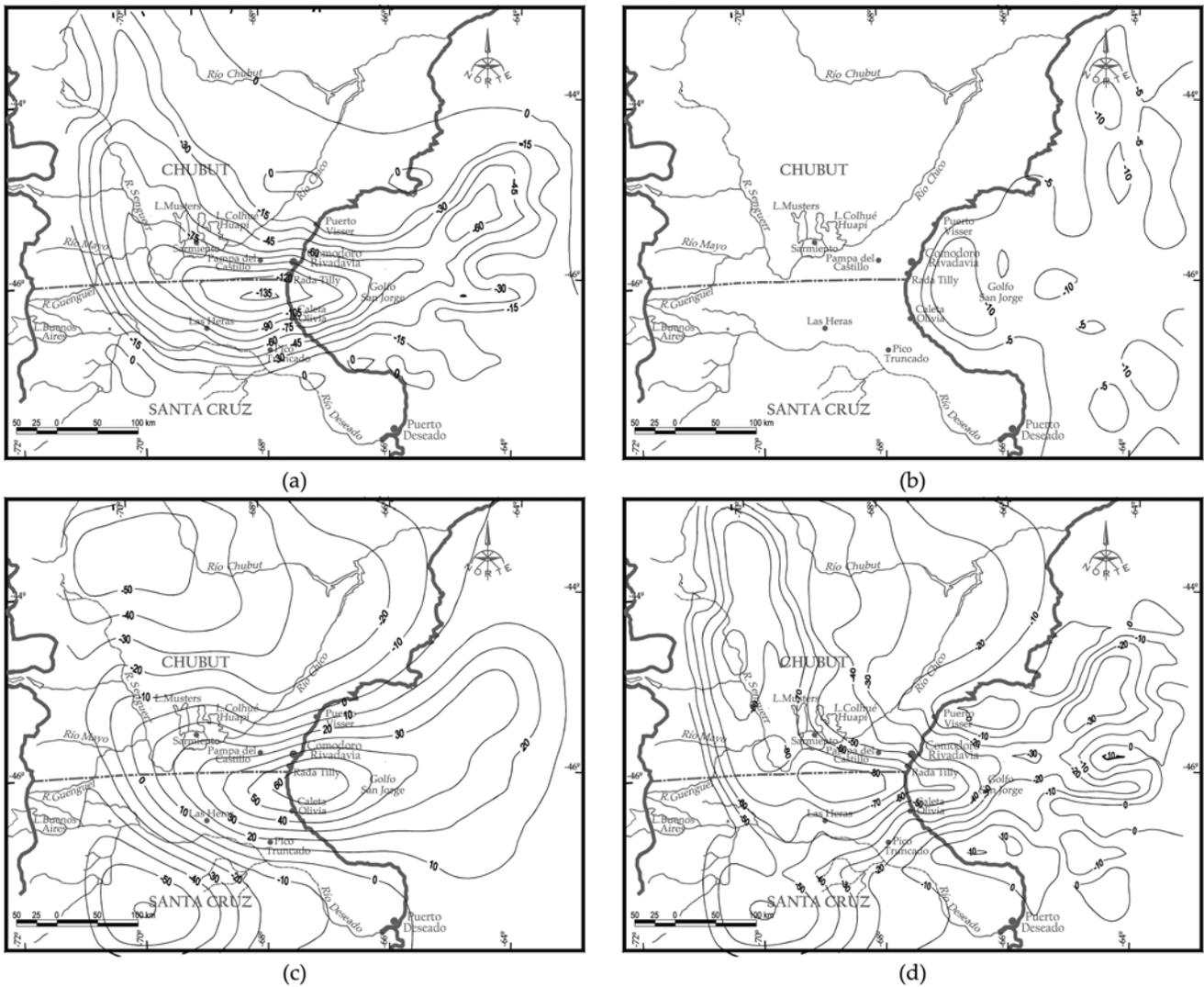
$$AF = AB_{Obs} + 2\pi \cdot G \cdot s' \cdot H_T \quad (13)$$

Donde  $CB$  es la corrección de la placa Bouguer,  $G$  es la constante de gravitación universal,  $H_T$  es la altura topográfica (extraída del modelo digital de elevación de

terreno) y  $\sigma'_T$  es la densidad de la masa interpuesta entre el punto de cálculo y el geoido, asumida coincidente con la densidad media del granito (Torge 2001, entre otros). Para la construcción del geoido se empleó el método de fuentes equivalentes cuya descripción puede verse, entre otros, en Introcaso (2006) o Introcaso y Crovetto (2005). Los cálculos de  $N$  (Fig. 10) se efectuaron empleando el software desarrollado por Guspí *et al.* (2004), empleándose un factor de profundidad igual a 1,4 (Cordell 1992) y una estimación de precisión igual a 0,1 mGal (una mayor exigencia que la utilizada en Guspí *et al.* (2004)) para el ajuste de las anomalías de entrada. Una vez obtenida la intensidad de las fuentes, es posible calcular el potencial anómalo (Introcaso y Crovetto 2005):

$$NE(x, y) = \frac{TE(x, y, z=0)}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} G \sum_{k=1}^N \frac{m_k}{r_{E,k}} \quad (14)$$

Donde  $NE$  es el valor de ondulación



**Figura 7:** a) Efecto gravitatorio del relleno sedimentario de la cuenca  $EG_{Sedim}$ . Equidistancia 15 mGal.; b) Efecto gravitatorio de la capa de agua  $EG_{C.A}$ . Equidistancia 5 mGal.; c) Efecto gravitatorio de las masas compensadoras  $EG_{M.Comp}$ . Equidistancia 10 mGal.; d) Efecto gravitatorio total  $EG_{Teórico}$  del modelo de comparación perfectamente compensado asumido para la cuenca. Equidistancia 10 mGal.

para la estación  $E$ ,  $G$  es la constante de gravitación universal,  $g$  es el valor de gravedad asumido comúnmente igual a 980 Gal,  $m_k$  es la masa calculada para la fuente ficticia  $k$ -ésima,  $r_{E,k}$  es la distancia entre la masa puntual  $k$ -ésima y la estación  $E$ . Nuestro propósito fue aislar la ondulación local observada producida por la cuenca en estudio. Para ello fue necesario comparar ambas morfologías de  $N_{Observado}$  y  $N_{Teórico}$ .

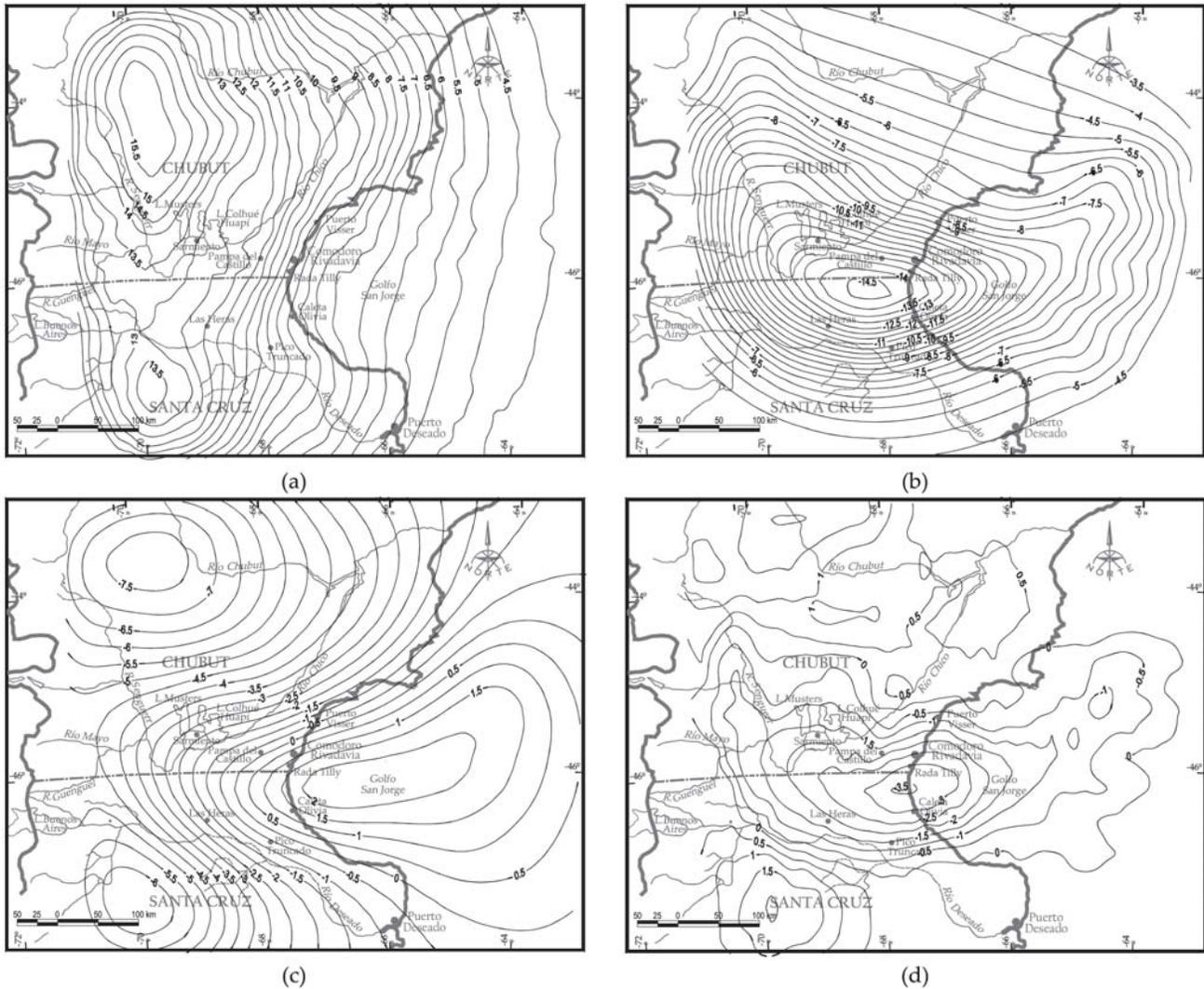
Debido al carácter regular de  $N_{Observado}$  decidimos asumirlo como ondulación regional sin modificaciones. Por otra parte, es sabido que el potencial está determina-

do a menos de una constante  $C$  (Trejo 1965, Introcaso y Crovetto 2005, entre otros). Esto nos permitió desplazar el  $N_{Teórico}$  en un valor fijo ( $\sim 2.40$  m) buscando la coincidencia con  $N_{Observado}$ .

### COMPARACIÓN DE DATOS OBSERVADOS VS. VALORES TEÓRICOS O DE COMPARACIÓN

Los valores observados de las anomalías de Bouguer,  $AB_{Obs}$  (véase Fig. 3), sin ser corregidos por los efectos del relleno sedimentario ni afectados por procedi-

miento de filtrado alguno, fueron comparados con los valores gravitatorios del modelo de comparación  $EG_{Teórico}$  (véase Fig. 8 (a), Ecuación 10). La diferencia numérica de los valores (Ecuación 15), que hemos denominado  $\Delta g_{Cuenca}$  (Fig. 11) se efectuó sobre los datos regularizados de las  $AB_{Obs}$  y  $EG_{Teórico}$ . Luego, empleando una sección que atraviesa la cuenca sobre su sector de mayor potencia sedimentaria continental en la dirección norte-sur (Fig. 12a), se muestran los órdenes de magnitud de cada uno de los valores involucrados como así también los resultados de la diferencia efectuada (Fig. 12b). Entonces:



**Figura 8:** a) Ondulaciones geoidales de las masas topográficas y sector oceánico  $N_{Topog}$ . Equidistancia 0,50 m; b) Efecto gravitatorio del relleno sedimentario de la cuenca  $N_{Sedim}$ . Equidistancia 0,50 m; c) Efecto gravitatorio de las masas compensadoras  $N_{M.Comp}$ . Equidistancia 0,50 m; d) Ondulación  $N_{Teórico}$  del modelo. Equidistancia 0,50 m.

$$\Delta g_{Cuenca} = AB_{Obs} - EG_{Teórico} \quad (15)$$

El perfil obtenido muestra residuos positivos que no coinciden con la respuesta gravitatoria esperable de acuerdo al modelo compensado asumido.

Con el mismo criterio se compararon las ondulaciones  $N_{Observado}$  y  $N_{Teórico}$  (desplazado). Aplicando la Ecuación (16) se obtuvieron las diferencias correspondientes (Fig. 13). En la Figura 14 se observan las mismas sobre la sección elegida (véase Fig.12 (a)).

$$\Delta N_{Cuenca} = N_{Observado} - N_{Teórico} \quad (16)$$

En este caso es posible nuevamente ob-

servar diferencias positivas que no representan la respuesta teórica del modelo adoptado.

### BREVE DISCUSIÓN

Ambos resultados  $\Delta g_{Cuenca}$  y  $\Delta N_{Cuenca}$  exhiben positivos que en esta línea de trabajo hemos atribuido a un exceso de antirraíz aunque no se pueden descartar explicaciones alternativas como, por ejemplo, significativa intrusión intracortical de densas masas o combinación de ambas posibilidades.

Cualquier alternativa implica una significativa descompensación a partir de la

cual podemos señalar una potencial subsidencia futura para restablecer el equilibrio. Esto reduciría la antirraíz y al mismo tiempo incrementaría el espesor sedimentario.

### CONCLUSIONES

El procesamiento de datos para caracterizar la corteza que contiene a la cuenca sedimentaria del Golfo de San Jorge no fue sencillo. Con el fin de asegurar mayor consistencia para realizar las validaciones del modelo hemos empleado una doble metodología trabajando no sólo con valores de gravedad sino además con ondu-

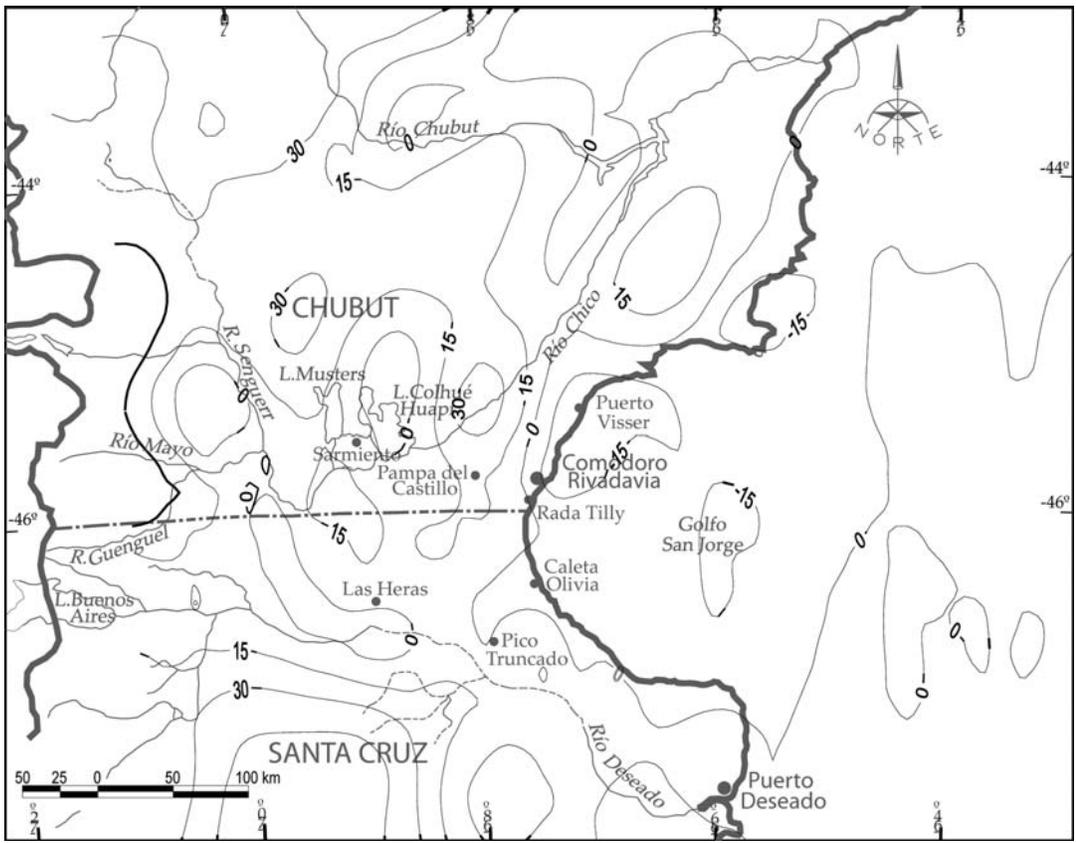


Figura 9: Anomalías  $AF$  obtenidas a partir de (13). Equidistancia 15 mGal.

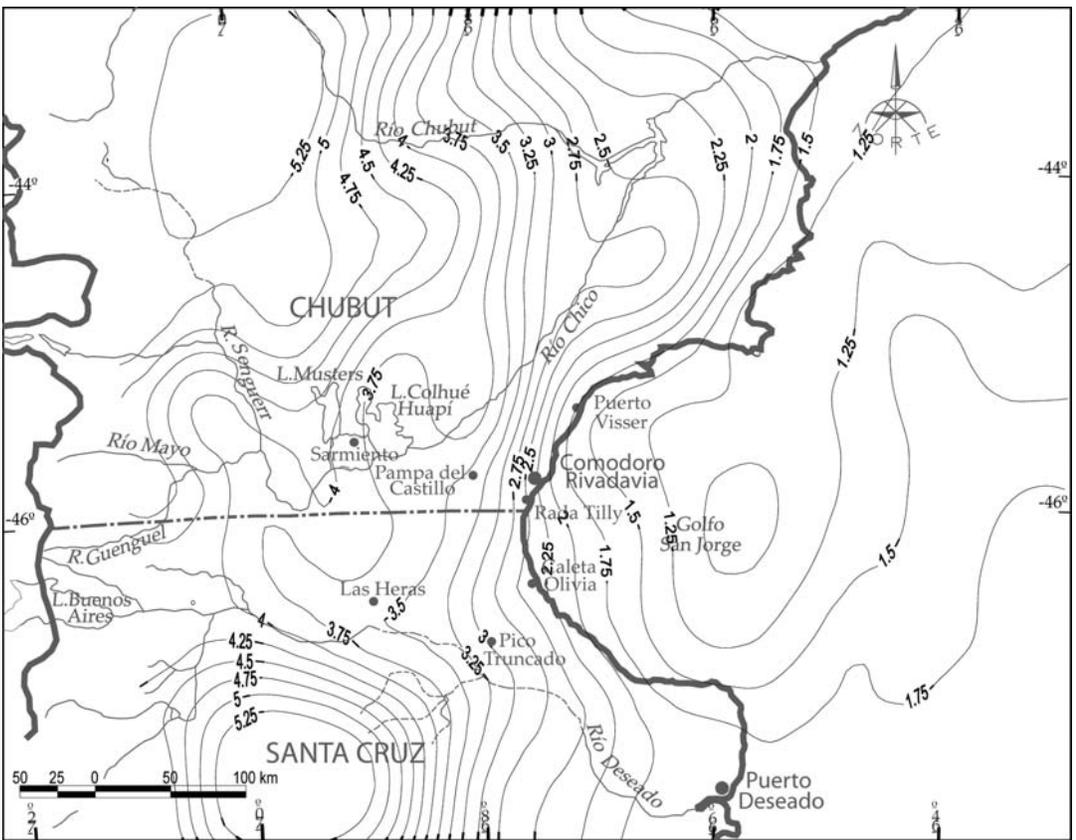


Figura 10: Ondulaciones geoidales calculadas  $N_{Observada}$  a partir de las  $AF$  y fuentes equivalentes.

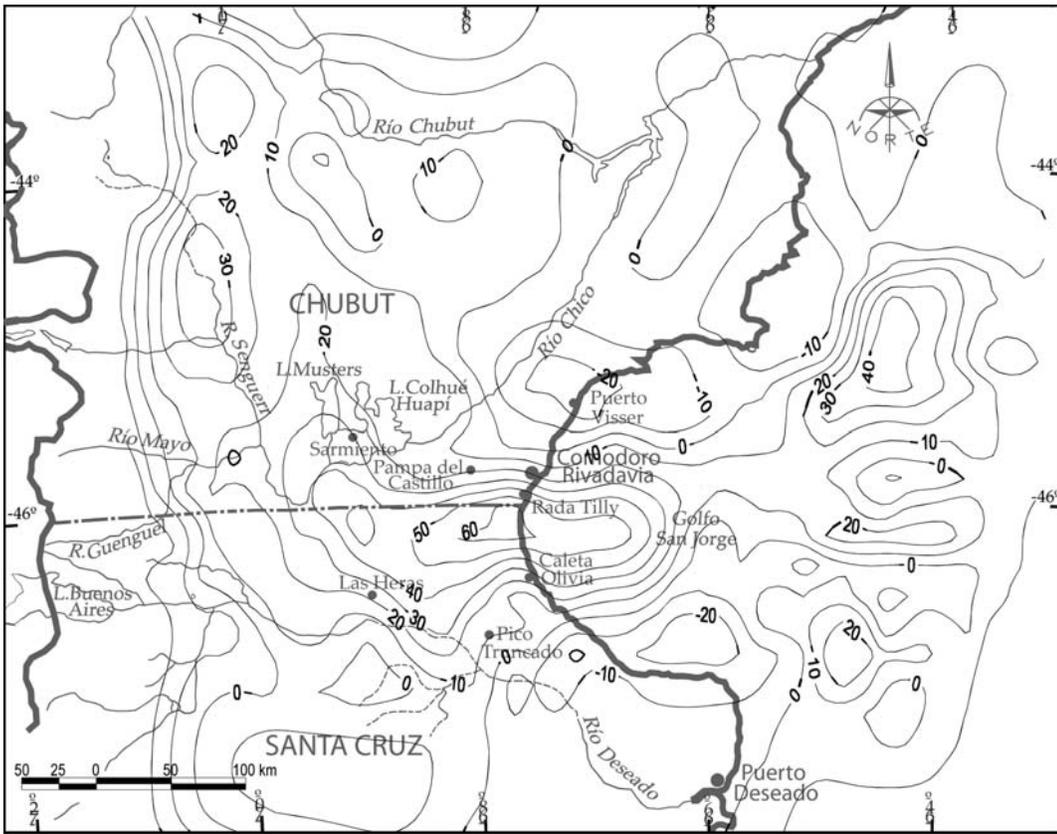
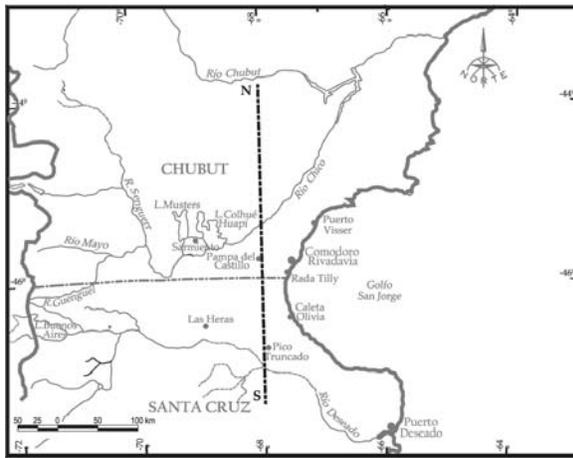
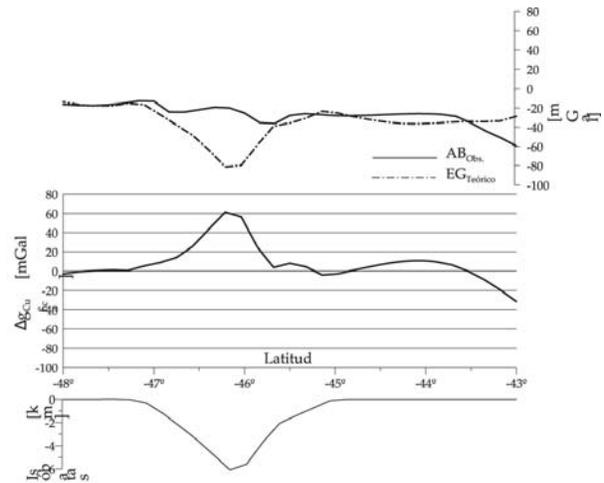


Figura 11: Diferencia  $\Delta g_{Cuenca}$  obtenidas a partir de la expresión (15). Equidistancia 10 mGal.



(a)



(b)

Figura 12: a) Localización geográfica de la sección N-S; b) Perfil N-S. Eje sup.: anomalías  $AB_{Obs}$  y efecto  $EG_{Teórico}$ ; Eje del medio: diferencias  $\Delta g_{Cuenca}$ ; Eje inf.: basamento de la cuenca.

laciones del geode. Por los dos caminos encontramos nítidos excesos de masas por debajo de las proximidades del depocentro. Ellos indican que la compensación de masas es aún imperfecta. El modelo asumido indica la existencia de una

antirraíz sobredimensionada que predice una futura subsidencia en busca del balance isostático. Otras alternativas tales como intrusión de masas intracorticales densas o combinación de éstas con exceso de antirraíz, no cambian la predicción

de hundimiento cortical compensado.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en el marco de la beca posdoctoral interna de Laura Cor-

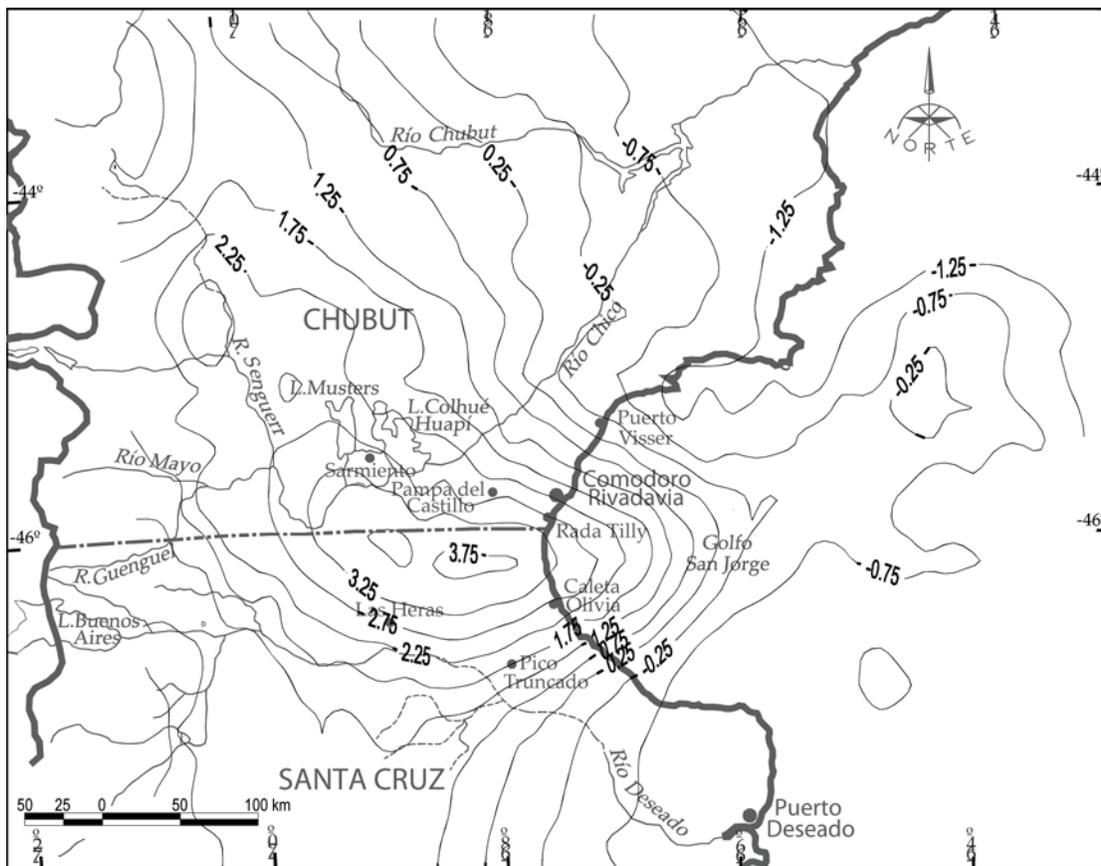


Figura 13: Diferencia  $\Delta N_{Cuenca}$  obtenidas a partir de la expresión (16). Equidistancia 0,50 m.

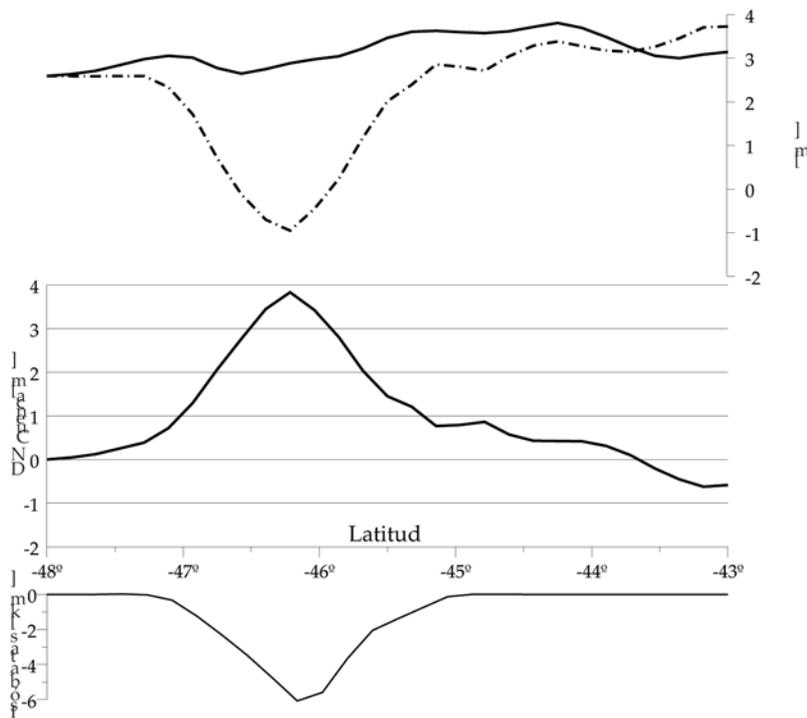


Figura 14: Perfil N-S. Eje Sup.: ondulaciones  $N_{Oservado}$  (línea continua) y  $N_{Teórico}$  (desplazado) (línea punto y trazos); Eje del medio: diferencias  $\Delta N_{Cuenca}$ ; Eje inf.: basamento de la cuenca.

naglia otorgada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y fue parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2002-00166).

Agradecemos las sugerencias de los Dres. Andrés Folguera y José Kostadinoff, árbitros del trabajo, quienes contribuyeron a mejorar el manuscrito original.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Almeida, F.F.M. de; Martín, F.C., Ferreira, E.O. y Furque, G. 1978. Tectonic map of South America. 1:5000000. Explanatory Note: Comision for the Geological Map of the World. DNP/MME, Publ. DNP/MME, 21 p., Brasilia.
- Baldi, J.E. y Nevistic, V.A. 1996. Cuenca costa afuera del Golfo San Jorge. En Ramos, V.A. y Turic, M.A. (eds.) Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental, 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio 10:

- 171-192.
- Bullen, K. 1963. An introduction to the theory of seismology. Cambridge University Press, 381 p., Cambridge.
- Cesanelli, M. y Lesta, P. 1973. Perfiles geofísicos prospectivos regionales en la Patagonia. *Geoscientia* 6(2): 77-82.
- Cordell, L. 1992. A scattered equivalent-source method for interpolation and gridding of potential-field data in three dimensions. *Geophysics* 57: 629-636.
- Crovetto, C., Novara, I. e Introcaso, A. 2007. A stretching model to explain the Salado basin (ARGENTINA). *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 77(1-2): 1-10, Rosario.
- Förste, C., Schmidt, R., Stubenvoll, R., Flechtner, F., Meyer, U., König, R., Neumayer, H., Biancale, R., Lemoine, J.-M., Bruinsma, S., Loyer, S., Barthelmes, F., y Esselborn, S. 2007. The GeoForschungsZentrum Potsdam/Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale satellite-only and combined gravity field models: EIGEN-GL04S1 and EIGEN-GL04C. *Journal of Geodesy*, DOI:10.1007/s00190-007-0183-8.
- Green, C.M. y Fairhead, J.D. 1991. The South American Gravity Project. En Torge, W. (ed.) *Recent Geodetic and Gravimetric Research in Latin America*, Springer-Verlag, 215 p., Berlin.
- Guspí, F. 1999. Fórmulas compactas para el cálculo del potencial gravitatorio de prismas rectangulares. *Contribuciones a la geodesia a fines del siglo XX. Homenaje a Oscar Parachú*. UNR Editora 7: 129-133, Rosario.
- Guspí, F., Introcaso, A. e Introcaso, B. 2004. Gravity-enhanced representation of measured geoid undulations using equivalent sources. *Geophysical Journal International (RAS)* 158: 1-8.
- Heiskanen, W. y Moritz, H. 1985. *Geodesia Física*. Instituto Geográfico Nacional. Instituto de Astronomía y Geodesia, 364 p., Madrid.
- Homocv, J.F., Conforto, G.A. y Lafourcade, P.A. 1993. Faja plegada en el subsuelo de la cuenca del Golfo San Jorge ejemplo de inversión tectónica., 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 233-240, Mendoza.
- Introcaso, A. 1980. Resultados gravimétricos sobre la cuenca del Golfo de San Jorge (Rep. Arg.). *Geofísica Internacional* 19(3): 221-238.
- Introcaso, A. 1997. *Gravimetría*. UNR Editora, 355 p., Rosario.
- Introcaso, A. 2006. *Geodesia Física*. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología. Volumen Especial 1, 128 p., Rosario. URL: <http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia>.
- Introcaso, A. y Crovetto, C. 2005. Introducción a la construcción del geoide. *Temas de geociencia* 12, UNR Editora, 56 p., Rosario.
- Introcaso, A., Diez Rodriguez, A., Fraga, H., Noci, A., Gerster, R. y Pacino, M.C. 1986. *Geophysical modelling procedures of sedimentary basins*, (inérito), 26 p.
- Introcaso, A., Guspí, G. e Introcaso, B. 2002. Interpretación del estado isostático de la Cuenca del Salado (Provincia de Buenos Aires) utilizando un geoide local obtenido mediante fuentes equivalentes a partir de las anomalías de aire libre. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas Artículo 139, 6p., El Calafate.
- Lesta, P., Ferello, R. y Chebli, G. 1980. Chubut Extraandino. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias 2: 1307-1387, Córdoba.
- Martin, R. 1954. Gravity Maxima corresponding with sedimentary basin. *Geophysics* 19: 89-94.
- Nafe, J.E. y Drake, C.L. 1957. Variation with depth in shallow and deep water marine sediments of porosity, density and the velocities of compressional and shear waves. *Geophysics* 22(3): 523-552.
- Okabe, M. 1979. Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies. *Geophysics* 44(4): 730-741.
- Sylwan, C. 2001. Geology de la Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Journal of Iberian Geology* 27: 123-157.
- Strelkov, E., Clavijo, R., Suárez, F., Rodríguez, J., Basile, Y. y Sanagua, J. 2005. La cuenca del Golfo San Jorge. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas: 275-288, Mar del Plata.
- Torge, W. 2001. *Geodesy. Third Edition*, Walter de Gruyter, 416 p., Berlin-New York.
- Trejo, C. 1965. *Análisis vectorial con teoría del potencial y aplicaciones*. Editorial Kapelusz, 331 p., Buenos Aires.

Recibido: 31 de marzo, 2009

Aceptado: 22 de septiembre, 2009