

# Fuerte anomalía gravimétrica residual positiva en el Sistema de Famatina y su relación con paleosuturas. Explicaciones alternativas

M. Patricia MARTÍNEZ<sup>1</sup> y Mario E. GIMENEZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CONICET-IGSV (Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi) FCEFyN, UNSJ. Meglioli 1160 Sur: Rivadavia. CP: 5400. San Juan. E-mail: mpm@unsj.edu.ar

<sup>2</sup>IGSV, FCEFyN, UNSJ. UNLR. UNSL. Meglioli 1160 Sur: Rivadavia. CP: 5400. San Juan.

**RESUMEN.** En este trabajo se presenta un perfil gravimétrico ubicado en la provincia de La Rioja (Argentina) a la latitud aproximada de 29° Sur. Se aplican métodos gravimétricos de máxima profundidad, encontrándose que bajo la sierra de Famatina la anomalía de masa se ubica en corteza inferior. Mientras que para la sierra de Velasco las máximas profundidades de las masas anómalas se indican para la corteza superior, en total coherencia con resultados anteriores. Se analiza la significativa correspondencia entre las estructuras geológicas y el campo potencial gravimétrico. La señal gravimétrica revela sin duda la zona de sutura existente entre la Precordillera y la sierra de Famatina, como así también la zona de cizalla entre la sierra de Famatina y la sierra de Velasco. Basándose en los resultados geofísicos y en las últimas investigaciones geológicas, se propone un modelo colisional (Modelo Cortical II) que describe la relación entre los terrenos Chilenia, Cuyania, Famatina y Pampia. Este modelo responde coherentemente a la anomalía de Bouguer observada.

Palabras clave: *Anomalia Positiva, Gravedad, Famatina*

**ABSTRACT.** *Strong positive residual gravity anomaly in the Famatina system and its relationship with ancient sutures: alternative explanations.* A gravity profile located in La Rioja province (Argentina) at an approximate latitude of 29° S. was analysed. Application of gravimetric methods of maximum depth shows that, under the Famatina Range, the anomaly of mass is located in lower crust. By contrast, in the Velasco Range, the maximum depths of the anomalous masses are within the upper crust, a result in total agreement with previous results. The significant correspondence between the geological structures and the gravity field was analysed. The gravity signal reveals clearly the zone of the suture present between the Precordillera and the Sierra of Famatina, as well as the shears zone between the Famatina and Velasco ranges. Using our geophysical results and previous geological investigations, we propose a collision model (II Cortical Model) that describes the relationship between the Chilenia, Cuyania, Famatina and Pampia terranes. This model agrees closely with the observed Bouguer anomaly.

Key words: *Positive Anomaly, Gravity, Famatina*

## Introducción

En la provincia de La Rioja se encuentran cuatro ambientes geomorfoestructurales diferenciados: las Sierras Pampeanas (SP), el Sistema de Famatina, la Precordillera y la Cordillera Frontal (Servicio Nacional Minero Geológico, 1973; entre otros), figura 1.

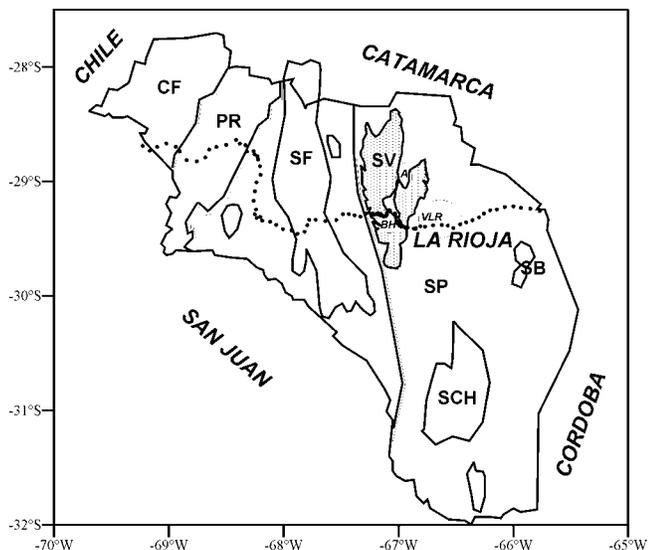
Este trabajo constituye la continuación de estudios geofísicos anteriores (Martínez *et al.* 1999; Martínez *et al.* 2000.a; Martínez *et al.* 2000.b.) En el primero a partir de la carta de anomalías de Bouguer de la sierra de Velasco, se analizaron cualitativamente cinco perfiles que la atraviesan completamente. Se encontraron significativos cambios gravimétricos sobre los flancos de la sierra que se asociaron con fallamiento. Por debajo de la sierra de Velasco las agudezas en la anomalía revelan

masas positivas más o menos someras. Mediante la aplicación del método frecuencial se determinaron que las masas anómalas se encuentran entre los 4 y los 12 km de profundidad.

En un segundo paso, se reunieron mediciones gravimétricas de los autores de este trabajo, con las provenientes de otras fuentes (IGM, IFIR, IGSV), y se construyó la Carta de Anomalías Simples de Bouguer para la provincia de La Rioja (Fig. 2). De esta manera se dispone hoy de un aporte geofísico regional para esta provincia.

Luego, se estudió el comportamiento isostático (en el sentido hidrostático, ver figura 3) de la sierra de Velasco. Los resultados se pueden resumir como sigue:

a) La sierra de Velasco se habría elevado sin desarrollar raíces compensadoras, tal como lo señala la significativa anomalía isostática positiva (+100 mGal). Al



**Figura 1:** Mapa de ubicación geográfica. ····· Perfil gravimétrico. — separación entre ambientes geomorfoestructurales: CF: Cordillera Frontal; PR: Precordillera; SF: Sistema de Famatina; y SP: Sierras Pampeanas. SV: Sierra de Velasco; SCH: Sierra de Chepes; SB: Sierra Brava; A: Aminga; BH: Bolsón de Huaco; VLR: Valle de La Rioja

igual que fuera destacado en los estudios previos sobre otras Sierras Pampeanas por Introcaso *et al.* (1987), Introcaso y Lion (1988), Toselli *et al.* (1989), Martínez *et al.* (1994), Miranda e Introcaso (1999) y Martínez e Introcaso (1999), el escaso ancho de esta sierra determina un sobrepeso que puede ser soportado por la corteza sin el desarrollo de raíces compensadoras.

b) Se observan tres mínimos “relativos” que se corresponden con las siguientes cuencas: el Bolsón de Huaco, Aminga, y el valle de La Rioja (hacia el flanco Este del Velasco). Un estudio preliminar sobre estos mínimos isostáticos “relativos” asociados con las cuencas intermontanas, indica que en todo el sector aumentaría la descompensación isostática. Esto se relaciona también con la compresión reconocida en esta zona a través de estudios sismológicos.

c) Es de esperar que cuando cesen los esfuerzos compresivos reinantes en la zona, la sierra de Velasco tenga movimientos descendentes tendientes a la creación de una raíz compensadora en busca del equilibrio isostático.

Ruiz e Introcaso (2000) realizaron una interpretación gravimétrica a la altura de la cuenca de Ischigualasto-Villa Unión, ubicada al SO de la sierra de Famatina, detectando una atenuación cortical señalada por los métodos de inversión gravimétrica e hidrostático.

No se cuenta con antecedentes de otras contribuciones geofísicas, constituyendo así éstas, las primeras en su estilo. Por otro lado existen trabajos geológicos desarrollados por Turner (1962), Caminos (1979), Rapela *et al.* (1992), Toselli *et al.* (1996), López *et al.* (1996), Ávila *et al.* (1999), Ramos *et al.* (2002), entre otros, que han sido considerados en esta contribución.

El perfil gravimétrico presentado aquí, atraviesa toda la provincia de La Rioja, desde el límite con la provincia de San Juan hasta la provincia de Catamarca (Fig. 1).

### Perfil gravimétrico ubicado aproximadamente a los 29° Sur

En base a la carta de anomalías de Bouguer (Martínez *et al.* 2000a), figura 2, se ha separado un perfil de medición de aproximadamente 330 km con el propósito de determinar las profundidades máximas causantes de las anomalías.

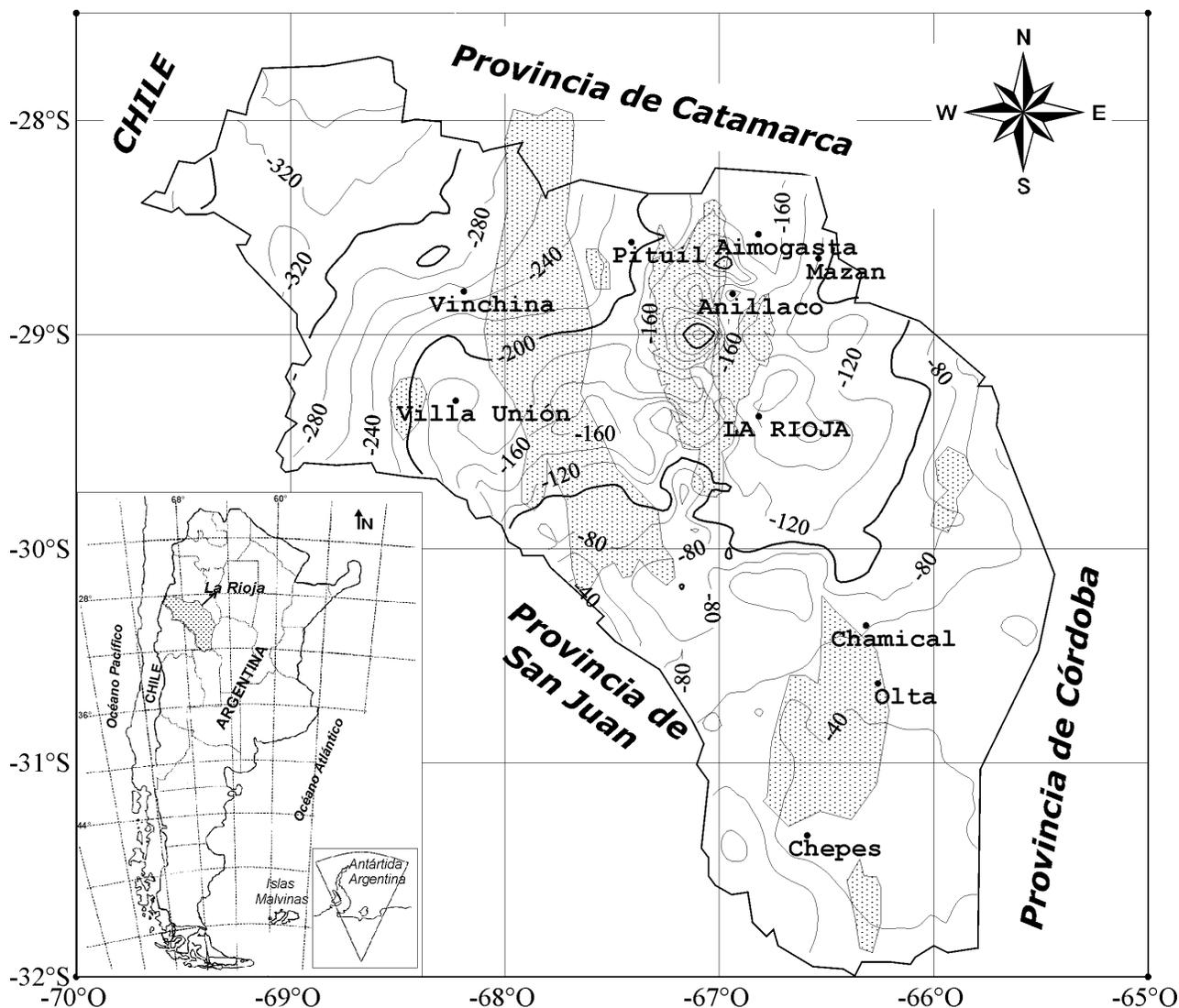
En la figura 1 se observa la ubicación geográfica de este perfil que comenzando a la altura del paraje La Majadita continúa por la ruta provincial 26 hacia el Este, recorre el Sur de las sierras de la Punilla y del Peñón, atraviesa el Bolsón de Jagüé y la sierra de los Colorados hasta localidad de Vinchina, se desvía hacia el Sur hasta Villa Unión y luego retoma la dirección Este por la ruta nacional 40. La sierra de Famatina se cruza por la Cuesta de Miranda, luego pasa por las localidades de Sanagasta y Nonogasta. Desde allí, retoma el camino en la ruta provincial 76 que finaliza en el sitio denominado La Puerta. Desde acá se atravesó la sierra de Velasco hasta la ciudad de La Rioja. El perfil continúa hacia el Este por la ruta nacional 5 cruzando el Desagüadero del río Salado, culminando en la localidad de San Martín en la provincia de Catamarca.

En este perfil de dirección E-O (Fig. 4) la anomalía simple de Bouguer presenta una tendencia descendente hacia el oeste, indicando en este caso la gran influencia de la raíz andina en la componente de “g”, con un gradiente de  $-0.8 \text{ mGal/km}$ . La señal gravimétrica revela significativas perturbaciones relacionadas directamente con las estructuras atravesadas.

Comenzando por el oeste existe un positivo gravimétrico de mediana longitud de onda que podemos asociar con la Precordillera, que está de acuerdo con la anomalía gravimétrica positiva determinada en otra latitud, a los 30° Sur por Giménez *et al.* (1997).

Luego se observa un positivo muy llamativo relacionado directamente con la sierra de Famatina. El elevado gradiente existente entre la Precordillera y la sierra de Famatina sin correlación con la topografía, permite evidenciar, sin duda alguna, la presencia de la sutura (mencionada por Ramos 1995; Astini *et al.* 1996; Toselli *et al.* 1996; entre otros), entre los terrenos correspondientes a estas estructuras. Este gran positivo puede estar justificado en el origen de su corteza pues algunos autores lo asocian a un arco de islas (Rapela *et al.* 1992; Toselli *et al.* 1996), ó una corteza continental atenuada (Manheim 1993). Para los autores de este trabajo, esto señala en pocas palabras “una corteza compuesta de materiales densos”, dando como resultado una anomalía de densidad positiva como la que se ve en la figura 4.

Este elevado salto gravimétrico de aproximadamente



**Figura 2:** Carta gravimétrica de la Provincia de La Rioja (2000). Anomalías simples de Bouguer. Isonómalas cada 20 mGal. Elipsoide internacional de referencia IGNS 1971. Reducción de aire libre: según Swick (1942). Reducción simple de Bouguer. Método de grillado: Kriging. Grilla: 70 X 70 datos. (extraída de Martínez *et al.* 2000a)

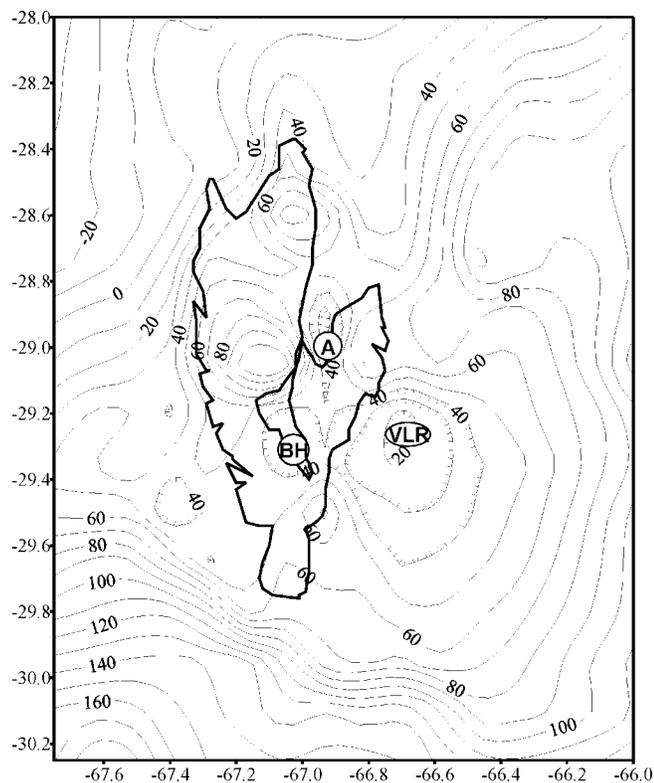
120 mGal es comparable con el obtenido entre la cuenca del Bermejo y la sierra de Valle Fértil, de 150 mGal (Martínez e Introcaso 1999). El primer antecedente gravimétrico que determina paleosuturas es el dado por Gibb y Thomas (1976), (ver figura 5). Otros antecedentes gravimétricos señalando suturas evidenciadas por elevado gradiente horizontal son conocidas por los trabajos de Thomas (1983), Marangoni *et al.* (1995), Ramé *et al.* (1995), Miranda e Introcaso (1999) entre otros.

En la sierra de Velasco aparecen dos anomalías gravimétricas de polaridad opuesta, y ambas de longitudes de onda corta pero muy agudas. Estas anomalías las correlacionamos directamente con las zonas de cizalla determinadas por López *et al.* (1996), con rumbo NNO-SSE. A través de esta zona de cizalla entre la sierra de Famatina y las Sierras Pampeanas Orientales, ascendie-

ron magmas ácidos y básicos (Toselli *et al.* 1996). Estos diferentes tipos de intrusiones se reflejan en la anomalía de masa como “negativos” (los ácidos) y “positivos” (los básicos).

### Análisis cuantitativo simplificado de la anomalía de Bouguer

Toselli *et al.* (1996), presentaron un esquema de evolución geotectónica para el Sistema de Famatina y sectores de las Sierras Pampeanas. Durante la colisión Oclóyica en la zona de cizalla, se emplazaron los cuerpos graníticos de Paimán y Copacabana, mientras que en las Sierras Pampeanas Orientales se intruyeron los granitoides de Velasco, Mazán, Zapata, Viquis y Capiilitas, sin influencia mantélica y en una “corteza de



**Figura 3:** Anomalía Isostática en la sierra de Velasco y regiones vecinas. En el cálculo de las raíces isostáticas compensadoras se ha tomado en cuenta la placa de Nazca. Espesor normal de corteza  $T_n=33$  kilómetros. Isoanómalas cada 10 mGal. BH: Bolsón de Huaco; VLR: Valle de La Rioja; A: Localidad de Aminga. (Modificada de Martínez *et al.* 2000b)

mayor espesor". Esta zona de cizalla también es propuesta en López *et al.* (1996).

Por otro lado Manheim (1993) describe la historia previa del Famatina en una corteza continental atenuada, tal cual parecen indicarlo los datos paleomagnéticos (Conti *et al.* 1995).

Si concordantemente con estos informes geológicos, se traza una pendiente regional por suavización, se advierte que la recta regional muestra "saltos". En la figura 4 se grafica esta pendiente regional con un salto relativo de 18 mGal entre la sierra de Famatina y la sierra de Velasco. Este salto gravimétrico indicaría una corteza de mayor espesor hacia el Este (sierra de Velasco).

### Método de máxima profundidad

I) Para calcular la máxima profundidad a la que se producen estos saltos en la anomalía de Bouguer, se tomaron las expresiones de máxima profundidad para una losa plana indefinida (Introcaso 1997),

$$g_d(x_d=z) = 2 G \sigma e (1/4 \pi) = g_{(m\acute{a}x)} / 4 \quad (1)$$

$$g_i(x_i=z) = 2 G \sigma e (3/4 \pi) = g_{(m\acute{a}x)} / 3 \quad (2)$$

siendo:  $g_i$  = gravedad en el punto ( $x_i = z$ ) a la izquierda del escalón;  $g_d$  = gravedad en el punto ( $x_d = z$ ) a

la derecha del escalón;  $G$  = Constante de Gravitación Universal;  $\sigma$  = densidad de contraste;  $e$  = espesor ó rechazo;  $g_{(m\acute{a}x)}$  = diferencia entre  $g_d - g_i$

En forma gráfica se mide la diferencia entre  $x_d$  y  $x_i$ , resultando:

$$z = (x_d - x_i) / 2 \quad (3)$$

Luego se aplicaron las expresiones para determinar el espesor o rechazo de la falla.

$$2 \pi G \sigma e = g_{(m\acute{a}x)} \quad (4)$$

II) Sobre las residuales encontradas se emplearon las expresiones de máxima profundidad para un cilindro enterrado

$$x_{(1/2)} = Z \quad (5)$$

Y después las expresiones para determinar el radio del cilindro:

$$R = (g_{(m\acute{a}x)} Z / 2 \pi G \sigma)^{1/2} \quad (6)$$

con  $R$  = radio del cilindro

Recuérdese que si no se dispone de otros datos, el menor de los  $h_{m\acute{a}x}$  (profundidades) elegidos entre los obtenidos con distintos procedimientos puede proporcionar una valiosa pista sobre la ubicación inicial del techo de las masas anómalas del modelo que será luego ajustado (Introcaso 1997).

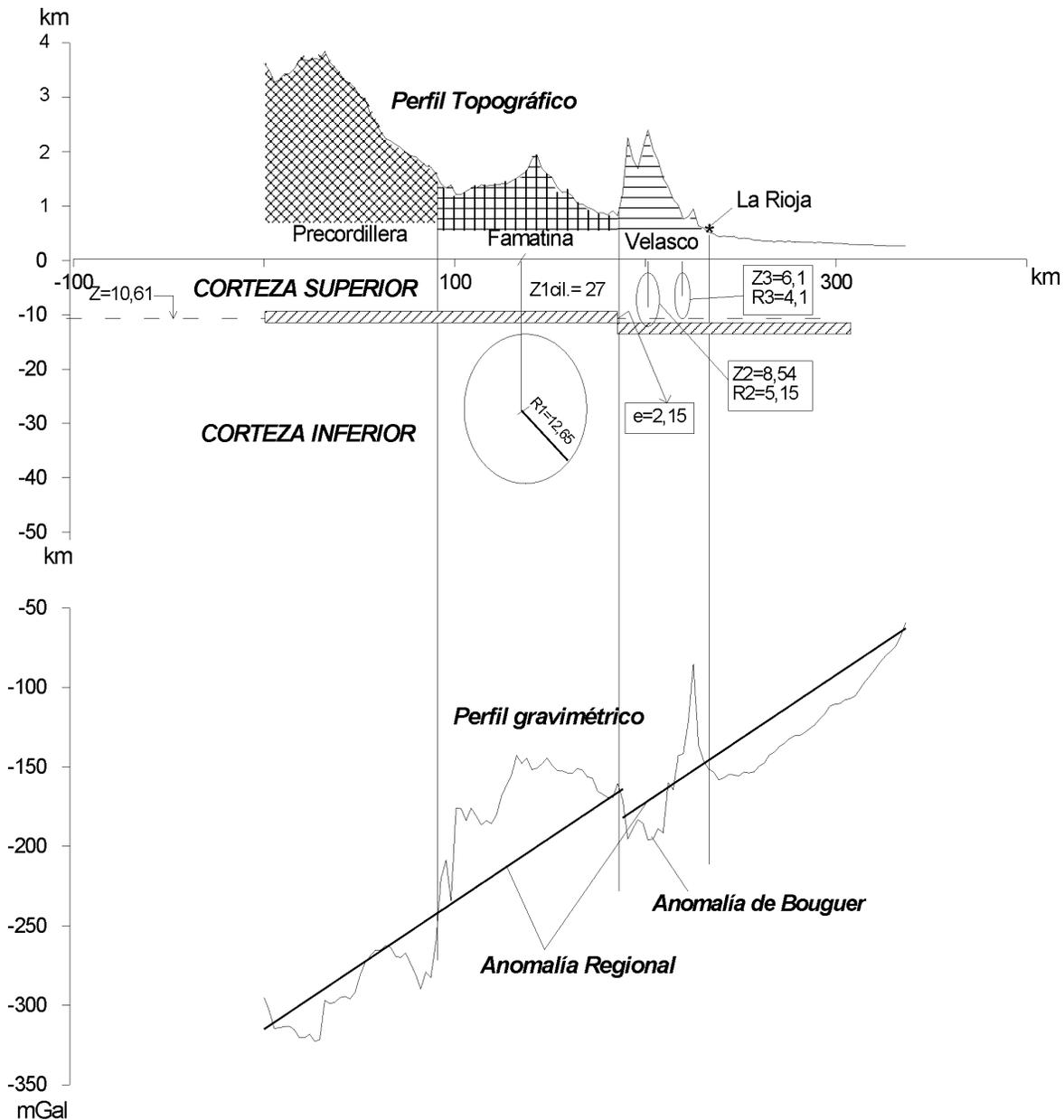
### Aplicación

La anomalía regional graficada en la figura 4, con un salto de 18 mGal entre las sierras de Famatina y la de Velasco, responde (a partir de la ecuación 3) a una profundidad de  $Z=10,61$  km, mientras que el cálculo del espesor (ecuación 4) resulta de  $e= 2,15$  kilómetros. Esta profundidad  $Z$  estaría relacionada con la discontinuidad intermedia, mientras que el espesor  $e$  se relaciona directamente con el rechazo de la falla, pues es compatible con las alturas de la sierra de Famatina a la latitud de este perfil (29° Sur).

Ahora, sobre las anomalías residuales correspondientes a las sierras de Famatina y a la de Velasco, se usan las ecuaciones 5 y 6. Se obtienen las profundidades para los cilindros anómalos enterrados y sus respectivos radios. En la Cuadro 1 se encuentran los resultados obtenidos. En las columnas 3 y 4, se han tomado diferentes contrastes de densidad  $\Delta\sigma= 0.2 \text{ g/cm}^3$  y  $0.3 \text{ g/cm}^3$ , para

**Cuadro 1:** Aplicación de los métodos de máxima profundidad para cilindros enterrados.

Máxima anomalía residual (mGal)	Máxima profundidad de la anomalía resid.	Radio del cilindro (con $\Delta\sigma = 0.2$ )	Radio del cilindro (con $\Delta\sigma = 0.3$ )
+50 (Sa. Famatina)	$Z_1 = 26,83$ km	$R_1 = 12,65$ km	$R_1 = 10,33$ km
-26 (Sa. Velasco O)	$Z_2 = 8,54$ km	$R_2 = 5,15$ km	$R_2 = 4,2$ km
+23 (Sa. Velasco E)	$Z_3 = 6,1$ km	$R_3 = 4,1$ km	$R_3 = 3,34$ km



**Figura 4:** Arriba, perfil topográfico con los resultados de la aplicación de los métodos de máxima profundidad. Las dimensiones de Z y R están dadas en kilómetros. Abajo, anomalía de Bouguer y anomalía regional con un salto de 18 mGal.

obtener las diferencias entre las máximas profundidades.

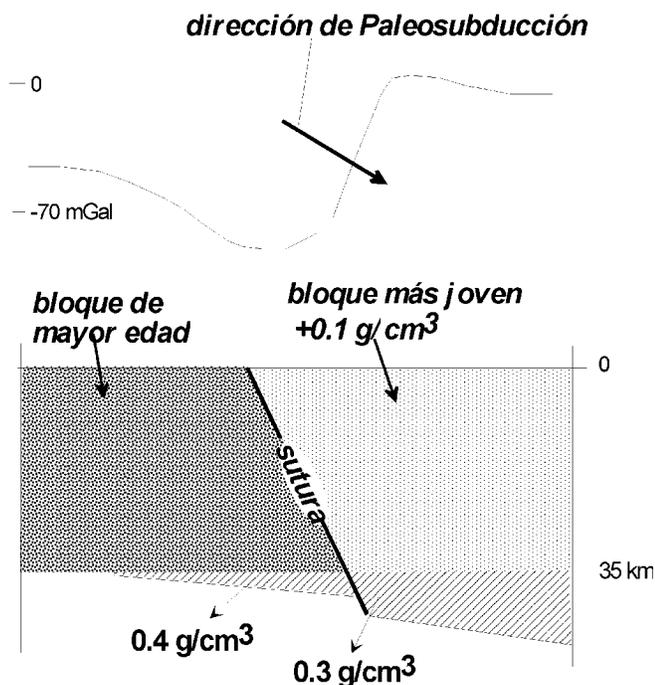
Nótese que las profundidades bajo la sierra de Famatina se corresponden con la corteza inferior, la máxima ( $26,83 + 12,65 = 39,48$ ), incluso la mínima ( $26,83 - 12,65 = 14,18$ ). Mientras que para la sierra de Velasco las máximas profundidades de las masas anómalas se indican para la corteza superior.

En la sierra de Velasco se han aplicado anteriormente los métodos de Filtrado Frecuenciales (Martínez *et al.* 1999) demostrando que las profundidades a las que se encuentra la masa anómala responden a corteza superior entre 4 y 12 km, resultado que se corresponde con

éste ( $Z2+R2 = 13,69$ ;  $Z3+R3 = 10,2$  km, máximos). Se observa así, la gran coherencia entre resultados anteriores y actuales, pues se llega a conclusiones similares analizando el campo gravimétrico con técnicas totalmente diferentes.

#### Modelo Cortical I (sin variación lateral de densidad)

A partir de determinar la anomalía regional, que responderá a la discontinuidad de Mohorovicic, se realizó modelo de inversión gravimétrica, considerando un modelo simple de corteza de dos capas, o sea dos losas



**Figura 5:** Par positivo-negativo de gravedad en el escudo Canádico, interpretado como respuesta a un modelo de corteza con variación lateral de densidad: dos bloques de distinta edad, espesor y densidad, puestos en contacto por una antigua sutura (esquemático, extraído de Gibb y Thomas 1976). Se señala la dirección de paleosubducción inferida por Thomas (1983).

planas indefinidas de Bouguer.

Para determinar la anomalía regional, se filtró el perfil siguiendo dos caminos:

1) Prolongación ascendente e inversión (método Pacino e Introcaso 1987). Prolongado hasta 20 km, esto incluye:

a) reducción de las anomalías de Bouguer al nivel medio del mar

b) Prolongación del campo potencial a distintas altitudes y elección de la señal gravimétrica que filtre las pequeñas longitudes de onda.

c) Inversión gravimétrica desde la altura elegida. Adoptando los siguientes parámetros: densidades de  $2,9 \text{ g/cm}^3$  y  $3,3 \text{ g/cm}^3$  para corteza inferior y manto superior; espesor normal de corteza  $T_n = 33 \text{ km}$  (Introcaso *et al.* 1992, entre otros).

d) Construcción del Moho gravimétrico.

e) Cálculo directo de la anomalía de Bouguer (desde la señal topográfica) del Moho determinado en d).

2) Calculando el efecto gravimétrico directo del perfil del Moho regional extraído de Introcaso *et al.* (2000), ver figura 6.

En la figura 6 se ve que, en términos generales, estas curvas de orígenes diferentes tienen gran similitud, aunque en términos particulares se apartan una de la otra. O sea existen diferencias entre ambos Moho, éstas

se deben a la mayor disponibilidad de datos para la construcción del denominado Moho por inversión gravimétrica, respecto del Moho general de la carta de la Argentina. La mayor diferencia entre estas dos curvas se encuentran bajo la sierra de Famatina, este resultado está señalando un adelgazamiento del Moho bajo la sierra de aproximadamente 6 kilómetros, (ver Cuadro 2).

### Modelo Cortical II (con variación lateral de densidad)

Es de destacar que en este paso se incluye la corrección topográfica en la anomalía de Bouguer. Se utilizó el programa CTOP del IFIR (Instituto de Física de Rosario), considerando la densidad de  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , para el exceso de masa (igual a la densidad utilizada para la corrección de Bouguer). De este modo se cuenta con la anomalía de Bouguer completa. Se puede observar en la figura 7 (abajo), que los efectos de la corrección topográfica son mínimos y en definitiva no modifican la morfología de la señal gravimétrica.

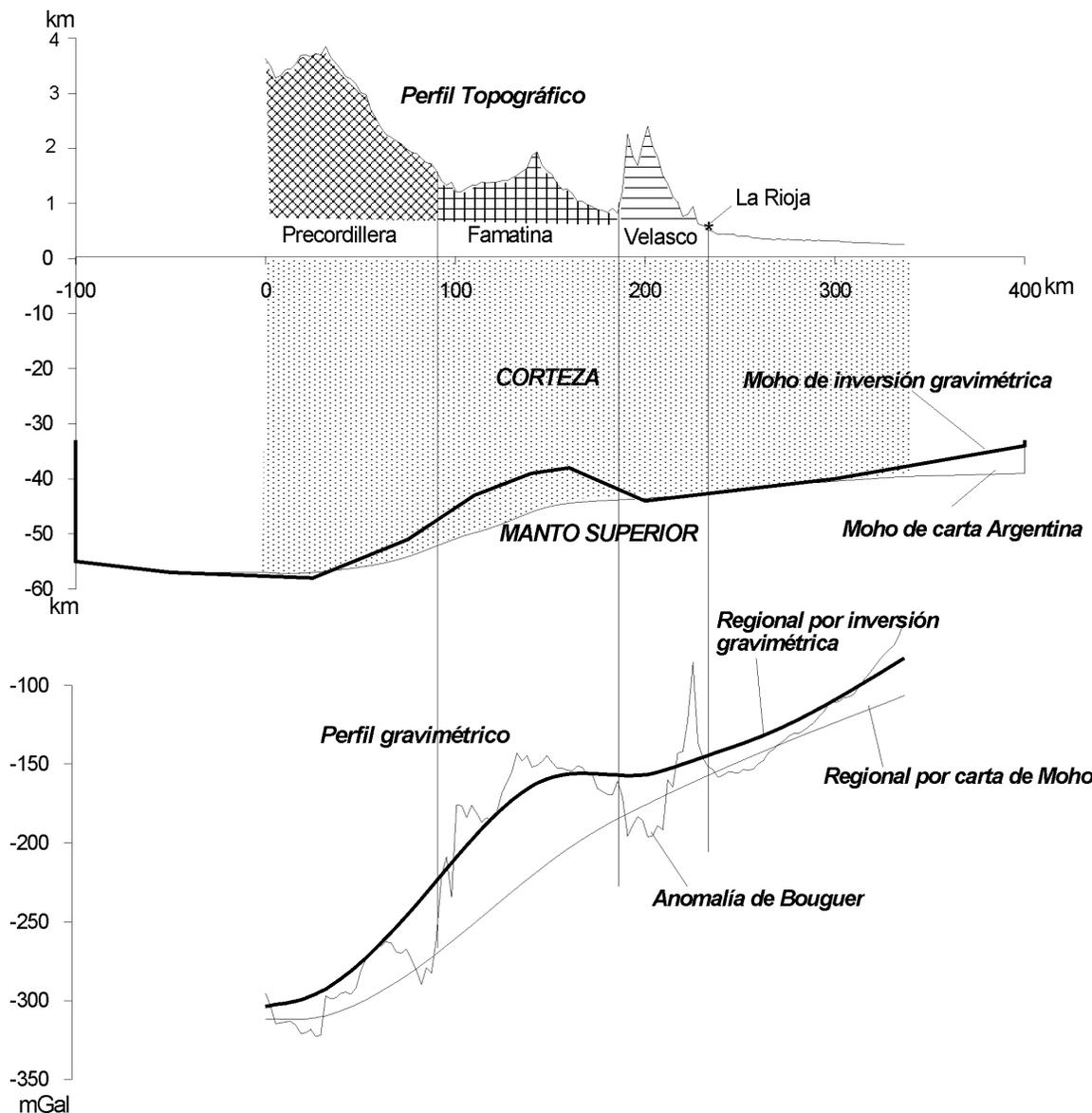
Para la construcción de este modelo de corteza (Fig. 7, arriba) se incluyen dos aspectos, en primer lugar se rescata la información que proporcionan la aplicación de los métodos de máxima profundidad: a) bajo la sierra de Famatina la profundidad de la masa anómala es a nivel de corteza inferior y, b) bajo la sierra de Velasco las profundidades del par negativo-positivo se ubican en la corteza superior; en segundo lugar se adiciona el conocimiento actual de los estudios de tectónica de placas (Astini *et al.* 1996; Toselli *et al.* 1996; Ramos *et al.* 2001; Ramos *et al.* 2002; entre tantos).

Se trata de un modelo de densidades, considerando una corteza de dos capas, que explica el acoplamiento entre los diferentes terrenos como una variación lateral de densidades. De esta manera el modelo contempla las diferentes colisiones entre los terrenos Chilena, Cuyania, Famatina y Pampia.

Las densidades iniciales del modelo de referencia son de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  para la corteza superior, de  $2,9 \text{ g/cm}^3$  para la corteza inferior, y de  $3,3 \text{ g/cm}^3$  para el manto superior, basadas en densidades medias mundiales (Talwani *et al.* 1959) y utilizadas por los autores de este trabajo en muchas oportunidades (Introcaso y Lion 1988; Martínez, 1997; Introcaso *et al.* 2000; entre varios).

**Cuadro 2:** Diferencias de profundidades encontradas cuando aplicamos dos métodos para la determinación de la anomalía regional. Profundidades bajo la sierra de Famatina y bajo la sierra de Velasco

	Famatina	Velasco O	Velasco E
Moho inversión (km)	38	44	43
Moho regional de carta Argentina (km)	44	43,3	42,8



**Figura 6:** Modelo Cortical I (sin variación lateral de densidad). Aplicación del método de inversión gravimétrica, para una corteza simple de dos capas. Con: espesor normal de corteza,  $T_n=33$  km; y para las densidades,  $2,7$  g/cm<sup>3</sup> para corteza superior,  $2,9$  g/cm<sup>3</sup> corteza inferior y  $3,3$  g/cm<sup>3</sup> para manto superior. Arriba: perfil topográfico y perfiles del Moho por inversión gravimétrica comparado con el Moho obtenido de la carta de Argentina (Introcaso *et al.* 2000). Abajo: anomalías de Bouguer y regionales.

Inspirado principalmente en el modelo geológico dado por Ramos *et al.* (2002), el modelo geofísico de la figura 7 contiene:

-El terreno Chilena, cuyas densidades son las del modelo de referencia. El exceso de raíz fue modelado con una densidad diferencial de  $\Delta\sigma=-0,4$  g/cm<sup>3</sup>, resultando con un máximo en el centro de la cordillera andina de 62 kilómetros.

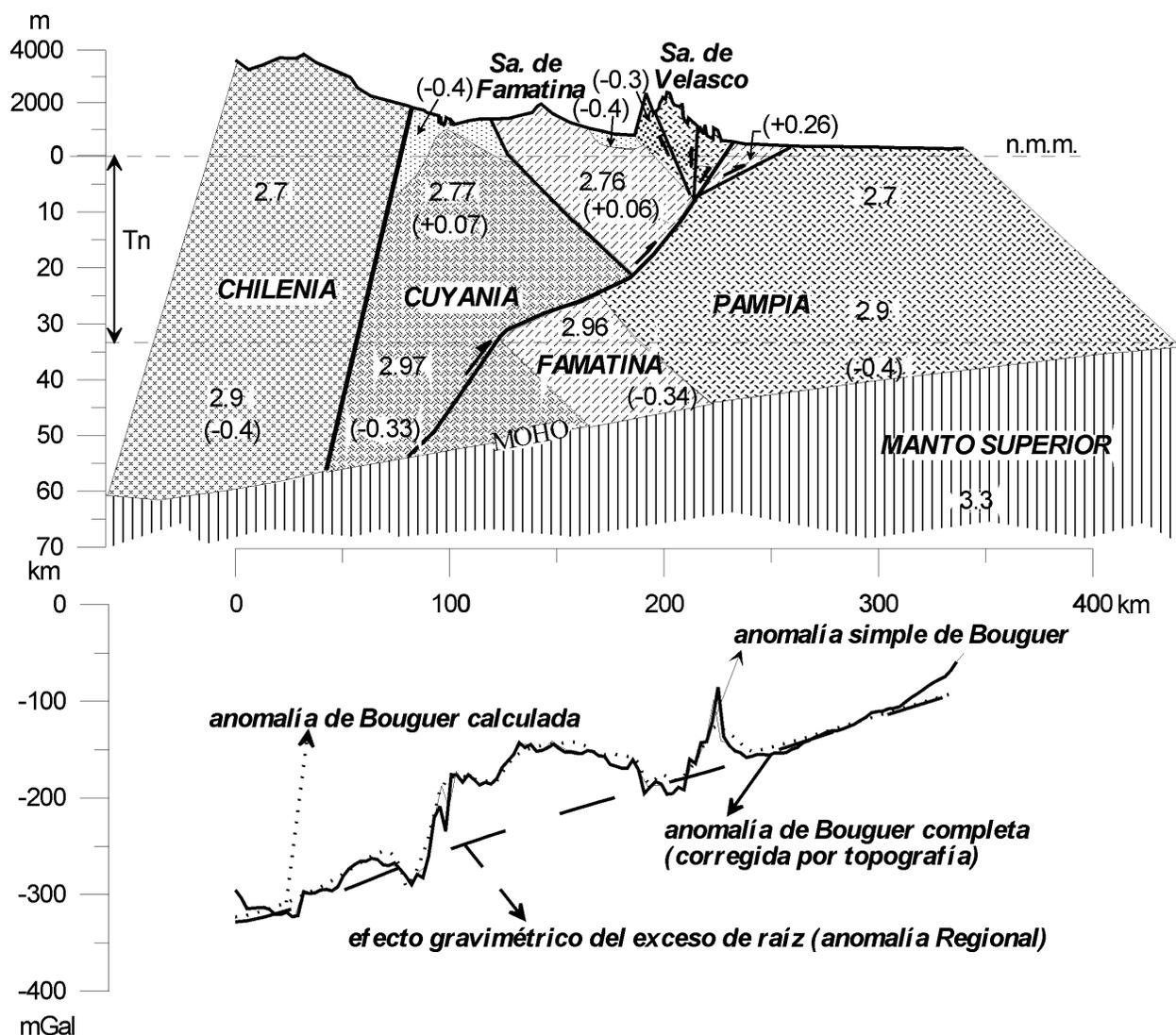
-El terreno Cuyania (o Precordillera) modelado en su conjunto con una densidad lateral diferencial de  $\Delta\sigma=+0,07$  g/cm<sup>3</sup>.

La densidad atribuida a este terreno se basa en las evidencias geológicas que permiten inferir que constituye un fragmento alóctono al Gondwana (Astini *et al.*

1996). Rocas máficas y ultramáficas de carácter ofiolítico en el borde occidental de la Precordillera se conocen desde Borrello (1963, 1969). Las toleitas oceánicas estudiadas geoquímicamente por Kay *et al.* (1984) han sido interpretadas como segmentos de dorsales oceánicas anómalos, influenciados por plumas (Haller 1995).

-Hacia la derecha se encuentra el terreno de Famatina, con la deformación del estilo *doble-wedge thrust system* (sistema de pliegue de doble acuñamiento), propuesto por Ramos *et al.* (2002).

La densidad diferencial utilizada en este terreno  $\Delta\sigma=+0,06$  g/cm<sup>3</sup> encuentra su justificativo en el origen de arco de isla (Toselli *et al.* 1996; entre otros).



**Figura 7:** Modelo Cortical II (con variación lateral de densidad). Arriba: Modelo de densidad de corteza simple de dos capas que asemeja las colisiones entre los terrenos Chilenia, Cuyania, Famatina y Pampia, inspirado en el modelo geológico de Ramos *et al.* (2002). Los números sin paréntesis son las densidades consideradas para cada terreno, y los que llevan paréntesis son las densidades diferenciales utilizadas para el cálculo gravimétrico, ambas se encuentran expresadas en  $\text{g/cm}^3$ . Tn: espesor normal de corteza, 33 kilómetros. Abajo: anomalías gravimétricas, simple de Bouguer (línea fina y continua), completa de Bouguer (línea gruesa y continua), anomalía regional (línea de trazos) y anomalía de Bouguer calculada (línea de puntos).

-La sierra de Velasco se ha modelado con dos tipos de discontinuidades de masa (A y B) ambas pertenecientes a la corteza superior.

A) Es la que corresponde a la porción occidental-central en donde se han contemplado cuerpos ácidos de densidad diferencial  $\Delta\sigma = -0,3 \text{ g/cm}^3$ ; y

B) Es la que comprende el flanco oriental de la sierra de Velasco y la parte oeste del valle de La Rioja, conformada con cuerpos pesados de densidad  $\Delta\sigma = +0,26 \text{ g/cm}^3$ .

Estas dos densidades diferenciales (- y +) las podemos justificar siguiendo las ideas de Toselli *et al.* (1996), quien propone que a través de la zona de cizalla entre la sierra de Famatina y las Sierras Pampeanas Orientales ascendieron magmas ácidos y básicos.

Por otro lado, observando la geometría de la figura 4b de Ramos *et al.* (2002), se puede sospechar que la porción (b), podría corresponder a un ascenso desde los niveles de la corteza inferior del terreno de Famatina, y en este caso implica una densidad diferencial positiva como la utilizada.

Por último, a partir de la interpretación de las líneas sísmicas en el valle de La Rioja (Fisher *et al.* 2002) se determina una falla mayor de orientación E que levanta el basamento y controla el extremo N de la sierra Brava. Este ascenso, en donde materiales más densos ocupan el espacio de materiales menos densos, provoca también un contraste de densidad positivo (por ejemplo  $\Delta\sigma = 2,9 - 2,7 = +0,2$ ).

-Se han modelado las cuencas de Villa Unión (de la

Formación Vinchina), y la cuenca intermontana entre la sierras de Famatina y Velasco, el valle de Antinaco, con una densidad diferencial de  $\Delta\sigma = -0,4 \text{ g/cm}^3$ . Esta densidad se ha tomado como referencia teniendo en cuenta que la cuenca del Bermejo (hacia el Sur de Villa Unión) fue modelada por Giménez (1997) con ese contraste.

## Discusión

Cuando se tiene una residual positiva, como la anteriormente encontrada para la sierra de Famatina, y parte de la sierra de Velasco, existen tres posibilidades para su explicación:

- a) que la corteza (o una porción de la corteza) se torne más delgada. Falta de compensación isostática y en consecuencia un Moho adelgazado
- b) que la corteza (o una porción de la corteza) se torne más densa
- c) que cambios de espesor cortical y densidades combinadas, sean las causales.

La posibilidad a) fue explorada en el Modelo Cortical I (Fig. 6), resultando que bajo la sierra de Famatina existiría un adelgazamiento del Moho de 6 kilómetros, estando de acuerdo con informes geológicos que hablan de una corteza delgada (Manheim 1993). Sin embargo esta antirraíz determinada por inversión no responde al común de los estudios sobre las Sierras Pampeanas vecinas. Introcaso y Lion (1988) estudiaron la posibilidad de justificar las anomalías residuales positivas obtenidas sobre las Sierras Pampeanas de Pie de Palo-La Huerta y Chepes, a través de antirraíces, indicando que ellas no logran reproducir ni en longitud de onda ni en amplitud a las anomalías encontradas. Esto sólo proporciona una razón más para separar como entidades diferentes, el Sistema de Famatina de las Sierras Pampeanas.

La alternativa b) encontraría su justificación a través de materiales densos de distintos orígenes puestos en contacto a través de viejas suturas (paleosuturas) entre diferentes terrenos (Rapela *et al.* 1992; Astini *et al.* 1996; Toselli *et al.* 1996; Ramos *et al.* 2001; entre otros).

En el Modelo Cortical II (Fig. 7), se explora la posibilidad c) ya que se tienen que conjugar todos los gradientes: el de gran amplitud de onda que produce una corteza que gradualmente aumenta su espesor hacia la cordillera andina, el de mediana longitud de onda bajo la sierra de Famatina y los de pequeña longitud de onda ubicados en la sierra de Velasco.

Pese entonces a que, gravimétricamente son válidos ambos Modelos Corticales I y II. Se da fortaleza al Modelo Cortical II que contempla la amalgamación de terrenos de diferentes densidades (para-autóctonos o alóctonos), debido a las extensas certezas geológicas, paleontológicas, paleomagnéticas, etc., ampliamente difundidas.

## Conclusiones

La señal gravimétrica en este perfil refleja sin duda rasgos estructurales muy importantes inferidos por varios estudios geológicos, tales como: 1) La zona de sutura entre la Precordillera y la sierra de Famatina. 2) La zona de cizalla (entre las sierras de Famatina y de Velasco).

Mediante la aplicación de los métodos geofísicos como por ejemplo: El método de máxima profundidad para una losa plana indefinida, se encuentra que la profundidad a la que se indica el "salto en la anomalía regional" se corresponde con la discontinuidad intermedia (10,60 km), mientras que el cálculo del espesor responde al posible rechazo de la falla (2,15 km), pues es un poco mayor que las alturas de la sierra de Famatina a estas latitudes (29° Sur).

Los métodos de máxima profundidad para un cilindro enterrado en la sierra de Famatina, señalan que esta anomalía de masa se encuentra en la corteza inferior.

Aplicando el mismo método (cilindro enterrado) para las anomalías residuales en la sierra de Velasco se ratifica que estas anomalías de masa se encuentran en corteza superior. Se debe recordar que mediante la aplicación de métodos frecuenciales se había acotado la profundidad de las masas anómalas bajo la sierra de Velasco entre 4 y 12 kilómetros.

Los resultados obtenidos mediante inversión gravimétrica, considerando un modelo simple de dos capas, Modelo Cortical I, indican que bajo la sierra de Famatina existe un adelgazamiento relativo del Moho, de aproximadamente 6 km respecto de la tendencia general del Moho en estas latitudes (determinada por la carta de Moho de la Argentina).

Sin embargo cuando se considera un modelo colisional, con discontinuidades laterales de densidad en la corteza (terrenos diferentes, para-autóctonos o alóctonos), Modelo Cortical II, se determinan bloques que responderían a los terrenos de: Chilenia ( $\Delta\sigma = 0 \text{ g/cm}^3$ ), Cuyania ( $\Delta\sigma = +0,07 \text{ g/cm}^3$ ), Famatina ( $\Delta\sigma = +0,06 \text{ g/cm}^3$ ), y Pampia ( $\Delta\sigma = 0 \text{ g/cm}^3$ ). Las densidades diferenciales se justifican ampliamente debido a las rocas máficas y ultramáficas de carácter ofiolítico (en el terreno Cuyania), y al origen de arco de isla atribuido al Sistema de Famatina.

Este modelo de densidades, Modelo Cortical II, proporciona una respuesta gravimétrica que se ajusta coherentemente con la anomalía observada. Por otro lado estaría de acuerdo con las últimas investigaciones geológicas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos de CONICET: PEI N°0117/98 y PIP N° 03056/2001; y por el proyecto de CICITCA (UNJSJ)

Res. 2270-R-99. Los autores agradecen especialmente a los árbitros de este trabajo por las observaciones y comentarios realizados.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Astini, Ricardo A., Ramos, Victor A., Benedetto, Juan L., Vaccari N. Emilio y Cañas, Fernando L., 1996. La Precordillera: Un terreno Exótico a Gondwana. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas 5: 293-324.
- Ávila, J.C., Lazarte, J.E., Gianfrancisco, M., Fogliata, A. y Ruiz, D., 1999. Los depósitos metalíferos del norte de la sierra de Velasco y zonas aledañas (La Rioja-Catamarca). 14° Congreso Geológico Argentino. Salta. 2: 302-305.
- Borrello, A.V., 1963. Elementos del magmatismo simaico en la evolución de la secuencia geosinclinal de la Precordillera. Instituto de Investigación de Ciencias Naturales, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Revista, Serie Ciencias Geológicas, 1: 1-19, Buenos Aires.
- Borrello, A.V., 1969. Los geosinclinales de la Argentina. Dirección Nacional de Geología y Minería, Anales 14: 1-188, Buenos Aires.
- Caminos, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, 1: 225-291. Córdoba.
- Conti, C.M., Rapalini, B., Coira, B. and Koukharsky, 1995. Paleomagnetic evidence of an early Paleozoic accreted terrane in NW Argentina. Its implications in Gondwana-Laurentia interaction. IGCP 376, Laurentian-Gondwanan connections before Pangea Field Conference, Abstracts: 11. San Salvador de Jujuy.
- Fisher, N.D., Jordan, T.E. and Brown L., 2002. The structural and stratigraphic evolution of the La Rioja basin, Argentina. Journal of South American Earth Sciences. 15:141-156.
- Gibb, R.A. and Thomas, M.D., 1976. Gravity signature of fossil plate boundaries in the Canadian Shield. Nature. 262:199-200.
- Giménez, M.E., 1997. Estudio Genético y Evolutivo de la Cuenca Del Bermejo (Pcia.de San Juan) a partir de datos de Gravedad. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario. 270 p.
- Giménez, M.E., Martínez, M.P., Introcaso, A., Robles, J.A. y Uliarte, E., 1997. Análisis Hidrostático en una sección E-W a los 30°30'S que atraviesa la Precordillera Andina. 2° Jornadas de Precordillera. San Juan. Argentina. 220-225.
- Haller, M.J., 1995. A plume-influenced ridge-segment origin for the Precordillera ophiolite. Laurentian-Gondwanan connections before Pangea Field Conference, Program with Abstracts 16-17, San Salvador de Jujuy.
- Introcaso, A., 1997. Gravimetría. UNR Editora. 355 p.
- Introcaso, A., Lion, A.L. y Ramos, V., 1987. La estructura profunda de las Sierras de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 13 (1-2): 177-187.
- Introcaso, A. y Lion, A., 1988. Modelos gravimétricos preliminares sobre las Sierras Pampeanas de Pie de Palo, de La Huerta y Chepes. 5° Congreso Geológico Chileno. 2: 11-24.
- Introcaso, A., Pacino, M.C. and Fraga, H., 1992. Gravity, isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30° S and 35° S. Tectonophysics, 205: 31-48.
- Introcaso, A.; Pacino, M.C. and Guspi, F., 2000. The Andes of Argentina and Chile: Crustal configuration, Isostasy, Shortening and Tectonic features from Gravity Data. UNR Editora. Temas de Geociencia N°5. 31p. Rosario.
- Kay, S.M., Ramos, V.A. y Kay, R., 1984. Elementos mayoritarios y trazas de las vulcanitas ordovícicas en la Precordillera Occidental: Basaltos de rift oceánicos tempranos (?) próximos al margen continental. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2:48-65. San Carlos de Bariloche.
- López, J.P., Ibáñez Palacios, G. y Toselli, A., 1996. Geología, petrografía y tectónica de la Sierra de Copacabana, Provincia de Catamarca, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 2: 171-177.
- Manheim, 1993. Génesis de las vulcanitas eopaleozoicas del Sistema de Famatina, noroeste de Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Mendoza., 4: 147-155.
- Marangoni, Y.R., Assumpção, M. y Fernandes, E.P., 1995. Gravimetria em Goiás, Brasil. Revista Brasileira de Geofísica, 13(3): 205-220.
- Martínez, M.P., 1997. Estudio del levantamiento de la Sierra de Valle Fértil. (Provincia de San Juan). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería. 153 p. (inédita)
- Martínez, M.P. e Introcaso, A., 1999. Sierra Pampeana de Valle Fértil. Provincia de San Juan. Análisis Estructural a partir de datos Gravimétricos. UNR Editora. Temas de Geociencia. N°2: 80 p.
- Martínez, M.P., Gimenez, M.E., Introcaso, A. y Robles, J.A., 1994. Anomalía Isostática de la Sierra de Pie de Palo. San Juan. Argentina. 7° Congreso Geológico Chileno. 1: 657-661.
- Martínez, M. P., Gimenez, M. e Introcaso, A., 1999. Estudio Gravimétrico preliminar de la Sierra de Velasco. 14° Congreso Geológico Argentino. Salta. 1: 302-305.
- Martínez, M., Gimenez, M.E., Introcaso, A., Ruiz, Hünicken e Introcaso, Beatriz, 2000a. Carta Gravimétrica de la Provincia de La Rioja (1999). Anomalías Simples de Bouguer. Publicación del Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. Séptimo Volponi. UNSJ. FCEF. San Juan.
- Martínez, M., Gimenez, M.E., Introcaso, A., 2000b. Modelo de Moho Isostático Bajo la Sierra de Velasco. 20° Congreso de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas 2000. Actas en CD. Mendoza.
- Miranda, S. e Introcaso, A., 1999. Cartas Gravimétricas de la Provincia de Córdoba. Interpretación de la estructura profunda de la Sierra de Córdoba. República Argentina. UNR Editora. Temas de Geociencia N° 1. 45 p. Rosario.
- Pacino, M.C. e Introcaso, A., 1987. Regional anomaly determination using the upwards- continuation method. Bolletino Geofisica Teorica Applicada, 29 (114): 113-122.
- Ramé, G.A.; Kramer, P.E. e Introcaso, A., 1995. Evidencia geofísica de un Orógeno Colisional para el basamento Proterozoico de las Sierras de Córdoba. Argentina. 4° Congreso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. 1° Conferência da união Latino-Americana de Geofísica. 2:1041-1044. Rio de Janeiro.
- Ramos, V.A., 1995. Sudamérica: un mosaico de continentes y océanos. Ciencia Hoy, 6 (32):24-29, Buenos Aires.
- Ramos, V.A., Escayola, M. Mutti, D. and Vujovich, G.I., 2001. Proterozoic-early Paleozoic ophiolites in the Andean basement of southern South America. In: Dilek, Y., Moores, E. (Eds.). Ophiolites and Oceanic Crust: New insights from Field Studies and Ocean Drilling Program. Geological Society of America, Special Paper 349:331-349.
- Ramos, V. A., Cristallini, E.O. and Pérez, D.J., 2002. The Pampean Flat-Slab of the Central Andes. Journal of South American Earth Sciences. 15: 59-78.
- Rapela, C.W., Coira, B., Toselli, A. y Saavedra, J., 1992. El magmatismo del Paleozoico Inferior en el Sudoeste de Gondwana. Congreso Paleozoico Inferior de Ibero-América. Universidad de Extremadura. 21-68.
- Ruiz, F. e Introcaso, A., 2000. La estructura profunda de la cuenca sedimentaria Ischigualasto- Villa Unión: Una interpretación tectónica a partir de datos de gravedad y magnetismo (Parte 1). UNR Editora. Temas de Geociencia N° 4. 70 p. Rosario.
- Servicio Nacional Minero Geológico, 1973. Exploración Geológica - Minera de la Provincia de La Rioja (Plan La Rioja). Ministerio de Economía. Subsecretaría de Minería. 85 p.
- Swick, C.H., 1942. Pendulum Gravity Measurements and Isostatic Reductions. U.S. Coast and Geodetic Survey. Special Publications N°232.

- Talwani, M.; Worzel, J.L. and Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64(1):49-58.
- Thomas, M.D., 1983. Tectonic significance of paired gravity anomalies in southern and Central Appalachians; in Hatcher and Williams, 1983. *Contributions to Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*. Geological Society of American, Memoir 158, 113-124.
- Toselli, A.J., Introcaso, A., Aceñolaza, F.G. y Durand, F.R., 1989. Sección gravimétrica preliminar a través del Sistema de Aconquija, Provincias de Tucumán y Catamarca, Una hipótesis sobre su génesis Tectónica. Reunión Geotransectas América del Sur. Mar del Plata Argentina. 78-82.
- Toselli, A.J., Durand, F.R., Rossi de Toselli, J.N. y Saavedra, J., 1996. Esquema de Evolución Geotectónica y Magmática Eopaleozoica del Sistema de Famatina y Sectores de Sierras Pampeanas. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. 5: 443-462.
- Turner, J.C., 1962. Estratigrafía del tramo medio de la Sierra de Velasco y región oeste (La Rioja). *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias*. 42: 77-126. Córdoba.

**Recibido:** 28 de noviembre, 2001

**Aceptado:** 14 de abril, 2003