

Interpretación gravimétrica y estructura cortical en la cuenca de General Levalle, Provincia de Córdoba, Argentina

Mario E. Gimenez^{1,*}, Federico Dávila², Ricardo Astini², and Patricia Martínez¹

¹ CONICET, Instituto Geofísico Sismológico Volponi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.

² Laboratorio de Análisis de Cuencas, CICTERRA-CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina.

* mgimenez@unsj-cuim.edu.ar

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio gravimétrico realizado en la región de la cuenca sedimentaria de General Levalle, Provincia de Córdoba, Argentina. Mediante la inversión de datos gravimétricos se obtuvo la geometría del basamento de la región donde se encuentra la cuenca y la superficie de la interfase corteza-manto. Esta última resultó ser una superficie de pendiente suave que se profundiza hacia el oeste. El hecho de que la interfase corteza-manto sea casi plana indica que la columna de sedimentos no tiene una antirraíz que la compense isostáticamente. Posteriormente, el efecto gravimétrico de los sedimentos fue calculado y descontado de la anomalía de Bouguer. El resultado fue que en el área de la cuenca se identifica un efecto gravimétrico positivo, al cual se vincula con inhomogeneidades localizadas en la corteza intermedia.

Sobre la base de estos resultados gravimétricos, y su comparación con análisis estratigráficos y estudios de las cuencas de la región, se proponen posibles alternativas que tengan en cuenta la presencia de masas densas en la corteza intermedia: 1) Emplazamiento de magmas alcalinos durante la extensión cretácica; 2) una anomalía en la geometría de la corteza, ya sea por el efecto de una corteza adelgazada asociada al rifting cretácico o a la extensión cenozoica, o 3) debido a la flexión de la corteza superior durante la compresión andina.

Palabras clave: gravimetría, cuenca sedimentaria, cuenca extensional, Cretácico, Cuenca General Levalle, Argentina.

ABSTRACT

We present the results of a gravimetric study carried out in the region of the General Levalle sedimentary basin, Córdoba Province, Argentina. We obtained the geometry of the basement roof and the surface of the crust-mantle interface for the region where the basin is located. The latter resulted in a surface with a gentle slope deepening to the west. The fact that the crust-mantle interface is rather plane indicates that the sedimentary column has not an anti-root to isostatically compensate it. Also, the gravimetric effect of the sediments was evaluated and subtracted from the Bouguer anomalies. In the

basin area, a positive gravimetric effect was identified, which may be linked to inhomogeneities located in the intermediate crust.

On the basis of the gravimetric results, and their comparison with stratigraphic analysis and basin studies of the region, we propose possible alternatives that consider the presence of thick masses in the intermediate crust: 1) Emplacement of alkaline magmas during the Cretaceous extension; 2) an anomaly in the crust geometry, whether by the effect of a thinned crust associated to Cretaceous rifting or to Cenozoic extension, or 3) due to the flexion of the crust upper during the Andean compression.

Key words: gravimetry, sedimentary basin, extensional basin, Cretaceous, General Levalle Basin, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Durante el Cretácico temprano, los procesos tectónicos sucedidos en el sector sudamericano de Gondwana fueron altamente complejos (Chebli *et al.* 1999). Como resultado del impacto de la pluma Paraná-Ethendeka, se produjo un importante fenómeno de extensión oblicua que culminó con la fragmentación del Gondwana occidental a lo largo de la depresión del Atlántico austral (Chebli *et al.* 2005). La extensión se manifestó como un proceso de *rifting* activo (Sengor *et al.*, 1978; Ingersoll y Busby, 1995) con la apertura del Atlántico Sur. Por otro lado, en el margen pasivo de Sudamérica, generó un conjunto de

aulacógenos de rumbo NO-SE cuyos más característicos exponentes son las depresiones de Santa Lucía, Punta del Este, Salado y Colorado (Urien *et al.*, 1981; 1995; Uliana y Biddle, 1988; Ramos, 1996). En el interior continental de Sudamérica la reactivación extensional de dos importantes zonas de sutura produjo el desarrollo de sendos surcos de *rift* (denominados *Rifts* Cretácicos de la Argentina Central; Franzese *et al.* 2003; Rivarola y Spalletti 2006), asentados sobre corteza continental y que, con rumbo dominante noroeste, alcanzan longitudes del orden de varios centenares de kilómetros (Figura 1). El surco oriental o Sistema de *Rift* Pampeano Central (Ramos 1999), se localiza en la zona de sutura entre el Cratón del Río de La Plata, por el este, y el

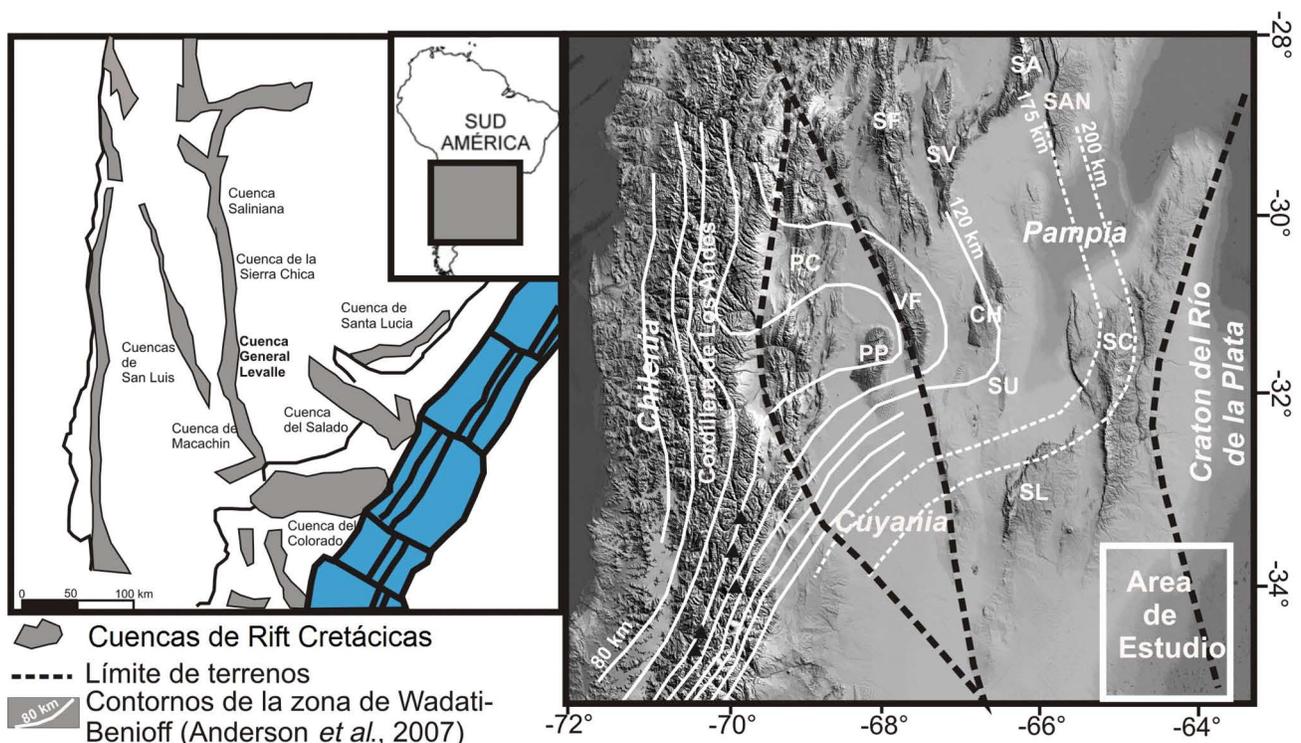


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. En la gráfica de la izquierda se indica el sistema de cuencas cretácicas. En la gráfica de la derecha, sobre el modelo de elevación digital del terreno, se graficó en blanco los contornos de la zona de Wadati-Benioff, en líneas de trazo en negro los límites de los terrenos Chilenia, Cuyania, Pampia y Cratón del Río de La Plata. Además, se indican las principales estructuras geológicas visibles: Cordillera de Los Andes, PC: Precordillera, PP: sierra de Pie de Palo, VF: sierra de Valle Fértil, SF: Sistema de Famatina, CH: sierra de Chépes, SU: sierra de Ulapes, SL: sierra de San Luis, SV: sierra de Velasco, SA: sierra de Ambato, SAN: sierra de Ancasti y SC: sierra de Córdoba.

Terreno Pampeano Oriental, por el oeste (Schmidt *et al.*, 1995). Está formado por un conjunto de depocentros conocidos como Cuenca de Macachín (Salso, 1966), General Levalle (Webster *et al.*, 2002, 2004), Los Cóndores (Ramos, 1999) y Sierras Chicas (Schmidt *et al.*, 1995). Más al norte, este sistema de *rift* se encuentra poco definido; no obstante, Álvarez *et al.* (1990) y Rossello y Mozetic (1999) han señalado la presencia de depósitos cretácicos en la denominada Cuenca Saliniana. De este modo, y como lo sugirieran Schmidt *et al.* (1995), Rossello y Mozetic (1999), Ramos (1999), Webster *et al.* (2002, 2004) y Jacques (2003), es probable que alcance a la Cuenca Cretácica del Noroeste Argentino (Figura 1).

En este trabajo tiene como objetivo presentar un estudio de la corteza que contiene a la cuenca de General Levalle (Figura 2), realizado a partir de información geológica y gravimétrica. Este análisis, además de darnos información sobre el estado actual de la corteza de la Llanura Argentina, en combinación con estudios estratigráficos de subsuelo ayudará a comprender las posibles causas de la subsidencia de las cuencas desarrolladas en esta gran planicie desde su etapa extensional cretácica hasta la actualidad.

SÍNTESIS GEOLÓGICA

Las cuencas cretácicas de la región central de la Argentina han sido interpretadas como sistemas de grábenes y hemigrábenes rellenos con sucesiones sedimentarias continentales, aluviales a lacustres (Webster *et al.*, 2002). Estas cuencas, originadas durante los movimientos distensivos y transtensivos dextrales del Cretácico, afectaron a gran parte de Sudamérica (Schmidt *et al.* 1995; Ramos 1996, 1999; Costa *et al.* 1999), constituyendo una faja submeridional que se extiende desde las cuencas norpatagónicas (del Salado, por ejemplo) hasta el *rift* de Salta que se continua en Bolivia. Desde el punto de vista mecánico, estos sistemas se interpretaron como *rift* pasivos (Uliana *et al.*, 1989) en los que los esfuerzos tensionales produjeron el debilitamiento de la litósfera continental (Allen y Allen 1990) favoreciendo el ascenso e intrusión de fluidos del manto a alta temperatura (Kay y Ramos, 1996). Por lo general, el flanco activo de estos *rifts* se ubica al oeste de cada bloque, caracterizado por fallas normales, escalonadas, de alto ángulo, que limitan fosas y semifosas con flancos hundidos basculantes (Webster *et al.*, 2002). La asimetría de las hemifosas ha tenido fuerte influencia sobre los sistemas de depósito, tal como lo sugieren tasas de subsidencia más elevadas hacia los flancos occidentales donde, tal como lo sugieren los modelos teóricos, la generación de espacio de acomodación sedimentaria es mayor (Schlische, 1991; Ziegler y Cloetingh, 2004).

En la parte central de Argentina, las cuencas de subsuelo de General Levalle y Macachín, (Fraga y Nocioni 1987; Webster *et al.* 2002, 2004; Kostadinoff y Llambías 2002) se presentan como una serie de depocentros orien-

tados submeridionalmente, con geometrías romboidales a ovoidales, en los que el espesor de sedimentitas cretácicas puede superar los 4000 m. En el caso de la cuenca de General Levalle (Figura 1), las dimensiones alcanzan los 150 km de largo, con un ancho que oscila entre los 5 y 50 km, con una superficie de ~5500 km². En secciones sísmicas (Webster *et al.*, 2002) se observa claramente que por debajo de los reflectores interpretados como la discordancia pos-albiana, relacionada al estadio terminal del rifting cretácico, la cuenca muestra una geometría de típica de graben asimétrico, con fallas normales limitando bloques basculados y un sistema de fosas y semifosas (véase Webster *et al.* 2004).

Un estudio gravimétrico previo en las cuencas de General Levalle y Macachín (Kostadinoff y Llambías 2002), ayudó a delimitar los bordes y la geometría de las cuencas. El alto gravimétrico al oeste de la cuenca de General Levalle corresponde al Alto de La Pampa (Figura 3), cuyo núcleo es probablemente el basamento de las Sierras Pampeanas Orientales (terreno Pampeano Oriental). El alto ubicado en

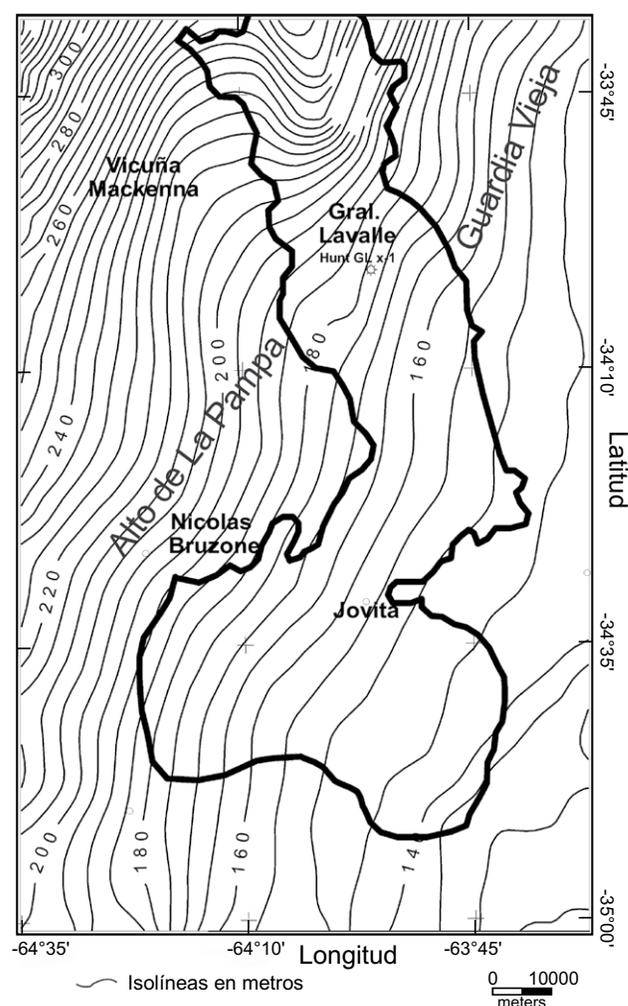


Figura 2. Modelo de elevación digital del terreno (MED), obtenido del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del Servicio Geológico de Estados Unidos y la NASA. Se ha superpuesto el límite de los bordes de la cuenca General Levalle con una línea continua negra más gruesa.

el este, es el de Guardia Vieja, interpretado como el antiguo basamento del Cratón del Río de la Plata (Figura 3).

El registro estratigráfico del Cretácico de estas cuencas está conformado por una espesa sucesión de sedimentitas clásticas y evaporíticas de ambientes continentales con las que se asocian importantes espesores de rocas volcánicas alcalinas (lavas basálticas acompañadas por traquitas y traquibasaltos), así como diques y filones capas de similar composición (Chebli *et al.*, 2005). En secciones sísmicas, esta sucesión tafrogénica está separada hacia arriba por un reflector de fuerte amplitud ubicado a ~ 0.4 segundos de profundidad (doble tiempo en secciones sísmicas). Este reflector marca el inicio de la secuencia cenozoica de la Llanura Pampeana, la cual tiene un patrón de subsidencia de gran longitud de onda que trasvasa la geometría de las cuencas cretácicas (Dávila *et al.*, 2005; Dávila, 2008).

METODOLOGÍA

Para realizar el estudio en la cuenca sedimentaria de General Levalle, se utilizó: (1) el mapa isobático del basamento de la cuenca tomado de Webster *et al.* (2004), (2) el perfil sísmico del pozo Hunt Cd. General Levalle x-1, (3) el modelo de elevación digital de terreno ETOPO2 (Figura 2), (www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html), y (4) los valores de gravedad observada, recolectados durante los años 2004 a 2007 por el Instituto Geofísico Sismológico Volponi, Universidad Nacional de San Juan y el Instituto de Física Rosario de la Universidad Nacional de Rosario.

La anomalía de Bouguer fue calculada en el Sistema Internacional de 1971, y los datos referidos a la estación fundamental de Miguelete. El cálculo de anomalías de gravedad se efectuó mediante expresiones clásicas, estan-

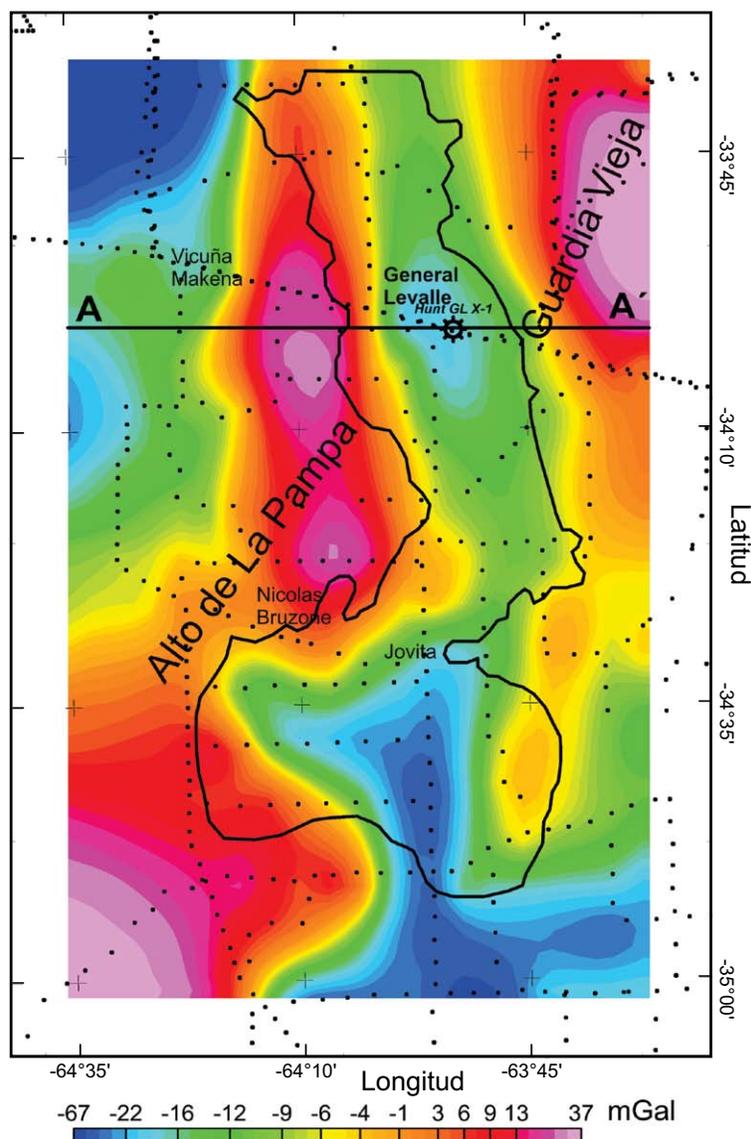


Figura 3. Mapa de anomalía de Bouguer y la distribución de puntos de gravedad medidos.

darizadas por Blakely (1995). Así, para la reducción de Aire Libre se aplicó el gradiente normal de 0.3086 mGal/m y para la reducción de Bouguer se utilizó una densidad de 2670 kg/m³. En la reducción topográfica se utilizaron dos mallas, una local y otra regional dentro de la zona de Hayford, con segmentos circulares de terreno hasta 167 km de diámetro. En Figura 3 se presenta la carta de anomalías de Bouguer, y sobre ésta la distribución de datos de gravedad.

Con el objeto de eliminar los efectos gravimétricos de corta longitud de ondas, la carta de anomalías de Bouguer (Figura 3) fue filtrada mediante técnicas como: 1) prolongación ascendente del campo potencial, prolongando a alturas desde 20 a 50 km (Pacino e Introcaso, 1988; Blakely, 1995); y 2) Filtro Butterworth con una ventana de corte a los 250 km y orden 8. De las diferentes cartas de prolongación ascendente, por los antecedentes en trabajos en área de Sierras Pampeanas (Miranda e Introcaso, 1999; Introcaso *et al.*, 2006) se seleccionó la anomalía regional prolongada a 40 km de altura (Figura 4); las anomalías regionales obtenidas por ambas técnicas son consistentes entre sí, con valores muy semejantes.

La anomalía residual de Bouguer se obtuvo de sustraer

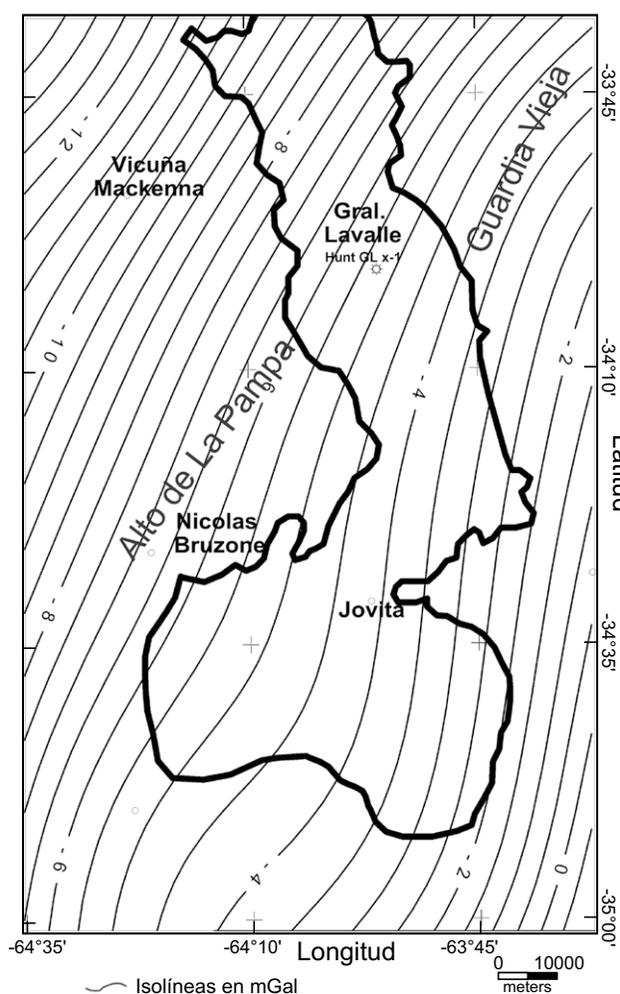


Figura 4. Mapa de anomalía regional de Bouguer.

el efecto gravimétrico regional (Figura 4) de la carta de anomalías de Bouguer. Así se obtuvo una anomalía residual de Bouguer que responde a efectos gravimétricos de estructuras geológicas desarrolladas en la corteza superior. En la Figura 5 se observa el contorno de la cuenca de General Levalle, con valores que alcanzan -16 mGal en el depocentro norte y -25 mGal en el depocentro sur, que se extiende hacia el sur y sureste de la carta.

Determinación de densidades

Con el objeto de determinar las densidades que fueron usadas en los modelos gravimétricos, las velocidades interválicas del perfil sísmico del pozo Hunt General Levalle x-1 (ver ubicación en Figura 3), que alcanzó una profundidad máxima de 5179 metros, se convirtieron a densidades mediante la expresión de Gardner *et al.* (1974):

$$\sigma = 0.23V^{0.25} \quad (1)$$

donde σ es la densidad en g/cm³; V es velocidad en pie/seg.

De esta manera se obtuvieron las densidades versus profundidades para las sedimentitas de la cuenca de General Levalle (Tabla 1). Se supuso un valor de 2800 kg/m³ para la corteza superior, ya que a 5000 metros de profundidad la densidad de las rocas obtenidas mediante la expresión (1) resultó de 2790 kg/m³. La densidad de la corteza inferior se consideró de $\sigma_i = 2900$ kg/m³, y la del manto superior de $\sigma_{ms} = 3300$ kg/m³, (cf. Woollard, 1969; Pacino e Introcaso, 1988; Watts, 2001, Turcotte y Schubert, 2002).

Modelo de basamento por inversión gravimétrica

Se calculó la geometría del basamento cristalino de la cuenca de General Levalle a partir de la anomalía residual de Bouguer, considerando las densidades obtenidas del perfil sísmico del pozo Hunt GL x-1 (ver Tabla 1).

El modelo 3D consistió de dos capas, la topográfica y el basamento cristalino. Para el cálculo se dejó fija la superficie topográfica, considerando una variación de la densidad con la profundidad (ver Tabla 1) y 2800 kg/m³ para el basamento cristalino. El campo gravitatorio fue "drapeado" a una altura constante de 320 m por encima de la máxima cota del terreno. La técnica de drapeado utiliza el conocido algoritmo de Cordell (1985), que consiste en calcular la continuación ascendente del campo gravitatorio obtenido en superficies rugosas a un plano de altura constante. En la inversión se ajustó la anomalía residual de Bouguer siguiendo a Popowski *et al.*, (2006).

Como resultado se obtuvo una superficie que puede interpretarse que corresponde al sustrato de basamento cristalino de la cuenca, cuyas profundidades fueron determinadas desde la cota topográfica (Figura 6). En ella se observa

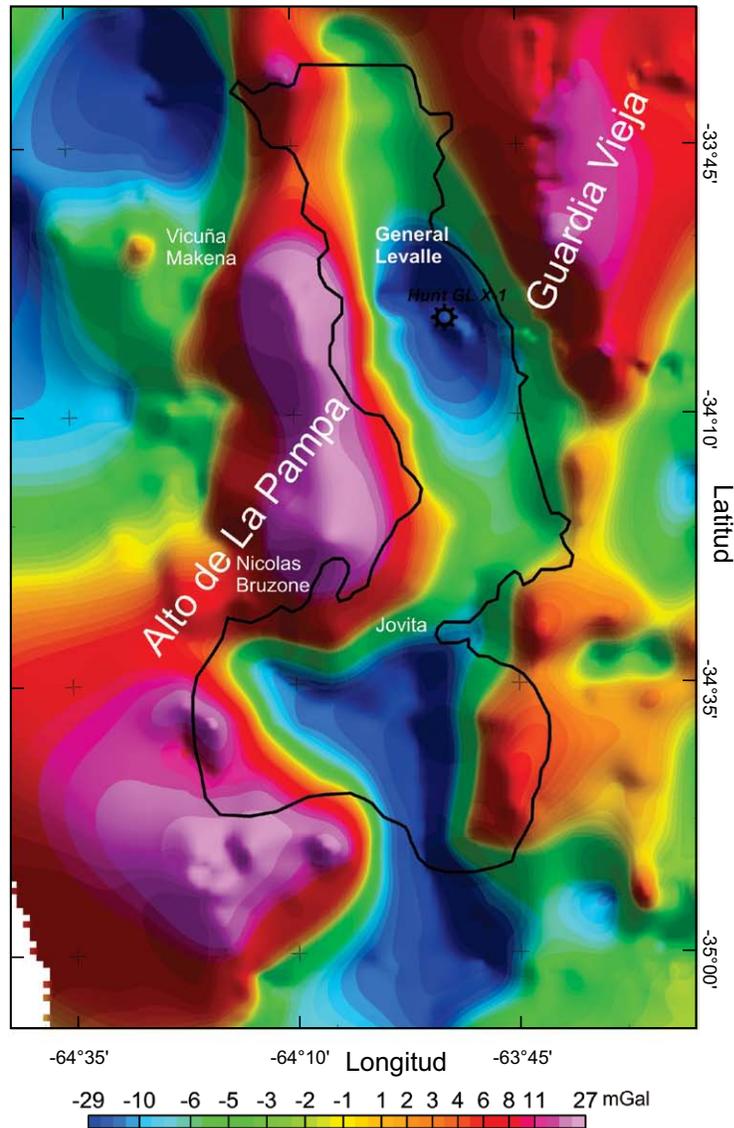


Figura 5. Carta de anomalía residual de Bouguer, obtenida mediante la prolongación ascendente a una altura de 40 km sobre el nivel del mar.

que el depocentro sur es el más profundo, alcanzando los 7200 metros de profundidad y se continúa hacia el sur de la carta posiblemente alcanzando la cuenca de Macachín. El depocentro norte (donde fue realizado el pozo Hunt GL x-1) es de menor profundidad, desarrollando 6000 metros. En los flancos de la cuenca de General Levalle, se encuentran altos del basamento no aflorantes, que se corresponden con el Alto de La Pampa por el oeste y con el basamento de Guardia Vieja por el este (véase también Chebli *et al.*, 2005).

Modelo de la interfase corteza-manto por inversión gravimétrica

Se calculó la profundidad a la superficie de la interfase corteza-manto a partir de la inversión gravimétrica, de la carta de anomalía de Bouguer prolongada a 40 km de altura

(Figura 4). Para el cálculo se utilizó un espesor promedio de corteza de 35 km, una densidad de 2900 kg/m³ para la corteza inferior y 3300 kg/m³ para el manto superior. El

Tabla 1. Relación profundidad-densidad obtenida del perfil sísmico del pozo Hunt General Levalle x-1, convertida a densidad mediante la expresión de Gardner *et al.* (1974).

Profundidad (m)	Densidad (kg/m ³)
-500	2200
-1000	2290
-1250	2470
-2000	2480
-2350	2540
-3200	2670
-4400	2730
-5179	2790

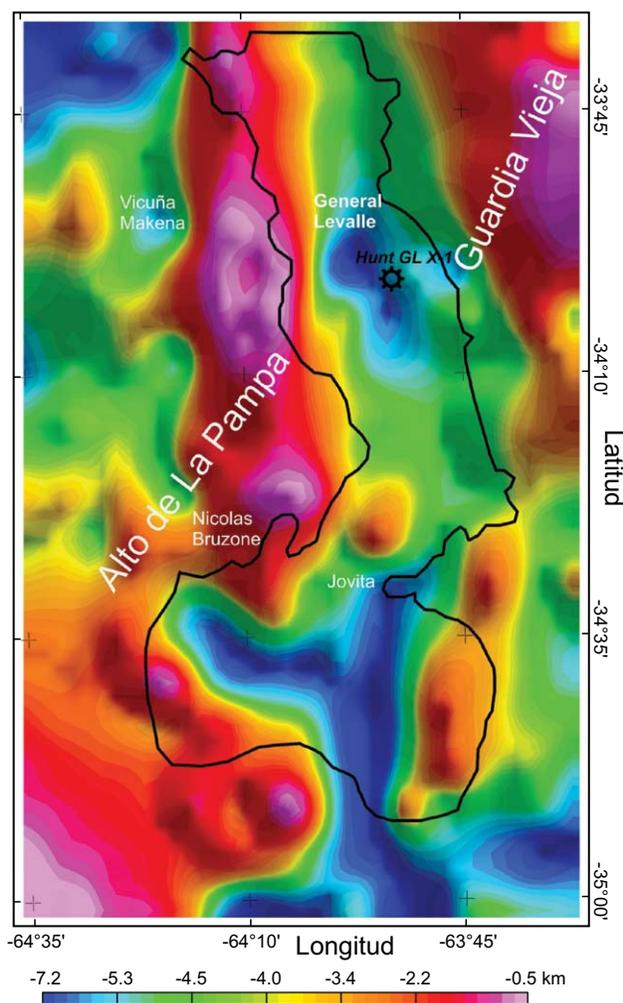


Figura 6. Mapa de basamento, obtenido por inversión gravimétrica de la anomalía residual de Bouguer.

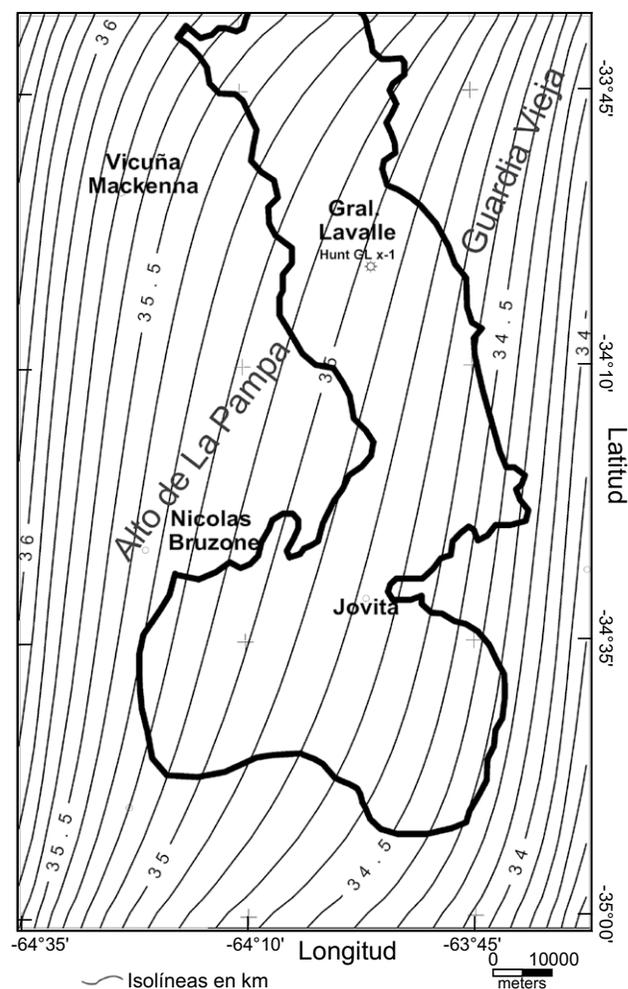


Figura 7. Superficie de la interfase corteza-manto obtenida de la inversión gravimétrica de la carta de anomalías regional de Bouguer.

resultado es una superficie de leve pendiente que profundiza hacia el noroeste (Figura 7). Este resultado es consistente con otros estudios de carácter regional tal como los realizados por Introcaso y Huerta, (1972); Introcaso *et al.*, (1992); Miranda e Introcaso (1999) y Gilbert *et al.*, (2006).

Estos resultados indicarían que la columna sedimentaria no tendría una antirraíz que la compense hidrostáticamente, dado que la discontinuidad corteza-manto no presenta evidencias de antirraíz.

Para analizar los efectos gravimétricos más profundos, se evaluó el efecto gravimétrico que producen los sedimentos de la cuenca de General Levalle, utilizando un modelado gravimétrico directo basado en la técnica desarrollada por Parker, (1973). Para el cálculo se utilizaron las isóbatas del basamento cristalino, obtenidas del modelo de inversión gravimétrico (Figura 6). A partir de la información del pozo Hunt GL x-1 se calculó una densidad media ponderada para todo el paquete sedimentario, resultando en 2370 kg/m^3 . En Figura 8, se presenta la carta de efectos gravimétricos

de los sedimentos. Este efecto gravimétrico del paquete sedimentario fue descontado de la anomalía de Bouguer (Figura 3) y en la Figura 9 se muestra la carta de anomalías de Bouguer corregidas por el efecto sedimentario, y que respondería a efectos gravimétricos producidos por cuerpos con variaciones de densidad ubicadas a mayor profundidad.

En la carta de la Figura 9 se observa que en el ámbito de la cuenca aparece una anomalía de Bouguer positiva, de relativamente corta longitud de onda. Esto permite inferir la presencia de masas densas que, por su mediana longitud de onda y por la ausencia de antirraíz (ver Figura 7), deberían estar ubicadas en corteza intermedia. Eventos similares han sido reportados por Lyngsie *et al.* (2007).

Esto sugiere que si bien la cuenca fue originada en el Mesozoico por un sistema de rift continental, esta estructura fue atenuada durante la fase andina, con el cambio de régimen tectónico (Ramos, 1999; Gómez *et al.* 2005; Mpodozis *et al.* (2005).

Modelo gravimétrico 2D

Se preparó un modelo gravimétrico 2D basado en la información geológica y geofísica existente, para analizar si es posible ajustar la curva de anomalía de Bouguer observada con la inclusión de una corteza intermedia atenuada. Para ello se trazó una sección A-A' (Figura 3) a la latitud de 34°S, que secciona a la cuenca de General Levalle por su máxima profundidad, obteniéndose el perfil gravimétrico que se muestra en la Figura 10. Las densidades para los sedimentos de la cuenca, son los mismos a los utilizados en los cálculos del modelo de inversión del basamento 3D, y que se resumen en Tabla 1. Las densidades utilizadas en corteza superior fue 2730 kg/m³, corteza inferior 2900 kg/m³ y manto superior 3300 kg/m³, respectivamente. El modelo cortical que ajusta la anomalía de Bouguer se presenta en Figura 10. Este modelo muestra la interfase corteza-manto suavemente inclinada hacia el oeste, sin presentar mayores modificaciones por debajo de la cuenca de General Levalle,

siendo necesario incorporar masas densas en la corteza intermedia para lograr el ajuste gravimétrico entre la curva de anomalía observada y calculada.

Este resultado apoyaría la idea del estiramiento sufrido por la cuenca en su formación, permitiendo el ascenso de materiales de la corteza inferior a la corteza superior debido al adelgazamiento cortical por elongación o fallamiento normal, preservados hasta el presente y registrados por las mediciones gravimétricas.

DISCUSIÓN

Con el propósito de aportar un control independiente al dato gravimétrico, consideramos en este análisis la estratigrafía de la cuenca de Gral. Levalle. A partir de información independiente proveniente de datos estratigráficos de pozos (Marengo, 2006) y de secciones sismoestratigráficas (p. ej., Webster *et al.*, 2004; Chebli *et al.*, 2005), se contrastan los resultados gravimétricos de la cuenca de Gral. Levalle.

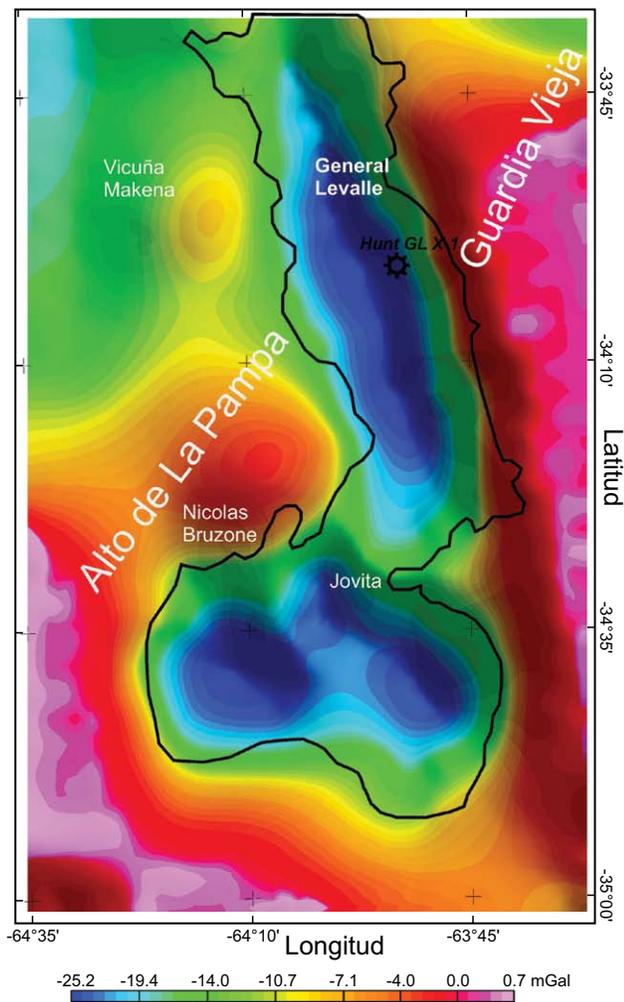


Figura 8. Carta del efecto gravimétrico de los sedimentos.

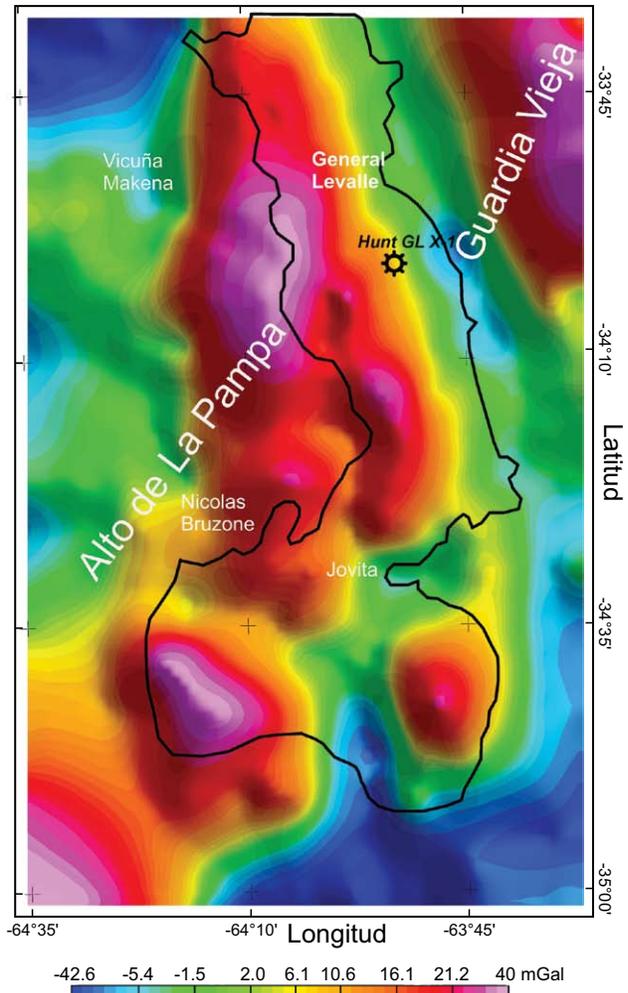


Figura 9. Mapa de anomalía de Bouguer sin el efecto gravimétrico de los sedimentos.

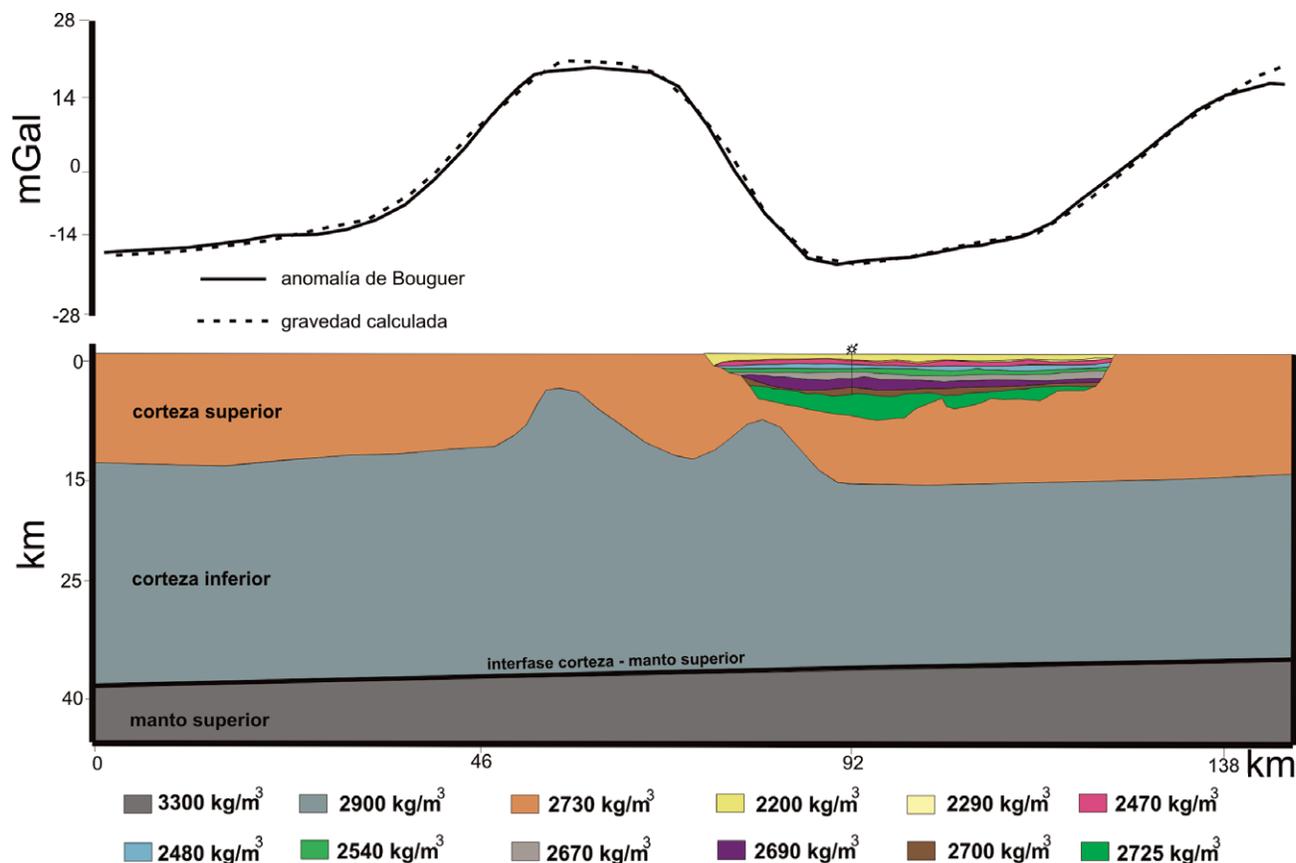


Figura 10. Modelo 2D de corteza, cuyo efecto gravimétrico justifica la anomalía de Bouguer de sección A-A' (Figura 3) a los 34° de latitud sur.

La historia de subsidencia cretácica-cenozoica de la cuenca de General Levalle puede ser dividida en tres etapas claramente separadas por episodios de erosión, ausencia de depósito y/o disminución en la tasa de sedimentación. El episodio de subsidencia más antiguo corresponde a la historia de relleno de grábenes, dominada por esfuerzos extensionales. Este relleno es separado por un reflector muy fuerte (ubicado a ~1 s en profundidad) que marca el comienzo de una etapa de subsidencia de longitud de onda un poco mayor y que trasvasa los límites del graben, interpretado como un episodio de subsidencia térmica. Otro reflector fuerte a los ~0.4 s (dependiendo la ubicación en la sísmica, Webster *et al.*, 2004) marca el inicio del acomodamiento de la cuenca cenozoica. Ésta se caracteriza en el subsuelo por una monótona sucesión de reflectores de gran continuidad lateral, de alta frecuencia y escasa amplitud (Webster *et al.*, 2004). El acomodamiento es del orden de la centena de kilómetros, y parece acompañar la geometría del depocentro de la cuenca cuaternaria de la Llanura Pampeana (Marengo, 2006).

Este patrón de acomodamiento de gran longitud de onda en las sucesiones terciarias fue también observado por Marengo (2006) a partir de reconstrucciones de datos de pozos. En su trabajo, el autor divide a las acumulaciones cenozoicas en cinco estadios de depósito, separados por pa-

quetes sedimentarios de origen marino-litoral (formaciones Laguna Paiva y Paraná).

Un mapa estructural al piso de los paquetes del Oligoceno-Mioceno de la Fm Laguna Paiva muestra el arreglo tabular y regular en sentido E-O y N-S (Figura 11), tal como es mostrado por las secciones sísmicas. Asimismo, considerando que la sedimentación de las transgresiones marinas debieron nivelar el paleorelieve post-cretácico y terciario inferior, relleno de los sectores con mayor subsidencia; de la observación de secciones estratigráficas regionales se descarta que para el Oligoceno-Mioceno y para el Mioceno Medio (edad de las formaciones Laguna Paiva y Paraná, respectivamente) hubiera existido una mayor subsidencia sobre la antigua cuenca cretácica de General Levalle. Además, puede observarse también que sobre la cuenca mesozoica de General Levalle no se acumularon tampoco los mayores espesores terciario-cuaternarios totales.

Del arreglo de isópacas cenozoicas, de los mapas estructurales al tope de estas etapas de sedimentación y de las secciones sísmicas se desprende que la cuenca de General Levalle no fue la región de mayor subsidencia en la región de la Llanura Pampeana durante los episodios de subsidencia cenozoica-cuaternaria.

El paquete de reflectores cenozoicos presenta una marcada tabularidad y gran longitud de onda que trasvasa el

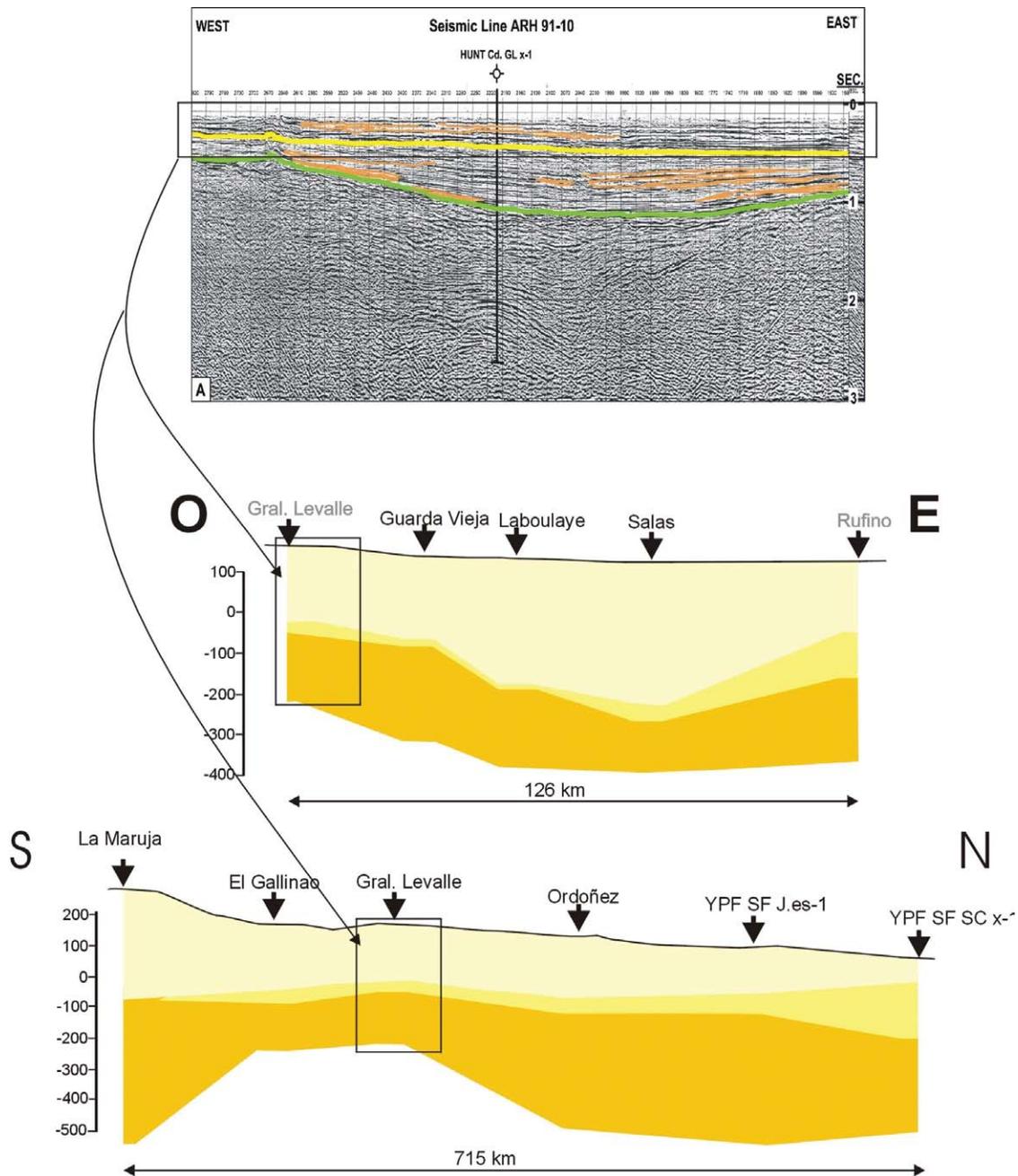


Figura 11. Secciones geológicas regionales, norte-sur y este-oeste del Cenozoico del subsuelo de la Llanura Pampeana (modificada de Marengo 2006). Los distintos tonos señalan los paquetes del Mioceno inferior (más oscuro), medio y superior (más claro). El paquete intermedio (Mioceno medio) representa los estratos marinos de la Fm Paraná. Los rectángulos muestran la ubicación de la sección sísmica ARH 91 (modificada de Webster *et al.* 2004) en el marco regional de la Llanura.

depo centro cretácico (Figura 11). Esto muestra claramente que es difícil que exista algún rasgo de descompensación heredado o generado luego de los esfuerzos compresionales en la cuenca mesozoica de General Levalle.

Dávila *et al.* (2005) y Dávila (2008) interpretaron que la mayor componente de hundimiento de la Llanura durante el Cenozoico habría sido generada por subsidencia dinámica (o topografía dinámica negativa; p. ej., Mitrovica *et al.*, 1989), por efectos compensatorios no isostáticos

(Hager, 1984) generados en la cuña astenosférica durante la subducción subhorizontal de la losa de Nazca por debajo de Sudamérica. Las constantes inundaciones en esta región, una de las más importantes desde el punto de vista agrícola-ganadero de Argentina, son posiblemente el resultado de la topografía dinámica, sumados a la influencia de la subsidencia flexural por carga generada por las sierras ubicadas al oeste de la región (véase Dávila and Lithgow-Bertelloni, 2008, Dávila *et al.*, 2010 y Gimenez *et al.*, 2009).

Suponiendo que las fuerzas de convección inducidas por la subducción de la placa de Nazca por debajo de las Sierras de Córdoba tienen influencia en la subsidencia post-cretácica (cf. Dávila and Lithgow-Bertelloni, 2008), se debería descartar que la anomalía de Bouguer corregida por el efecto de sedimentos registrada en este trabajo se deba a un efecto de "levantamiento" isostático post-mesozoico. Por el contrario, la dinámica del manto favorecería fenómenos de hundimiento dinámico del orden de la centena de metros en esta región del antepaís pericratónico (Dávila and Lithgow-Bertelloni, 2008), tal como lo sugieren los espesores sedimentarios cenozoicos de la Llanura (Dávila, 2008). Junto con los datos estratigráficos de subsuelo y los modelos geodinámicos recientemente desarrollados para esta región, las anomalías positivas podrían ser el resultado de: (1) la presencia de cuerpos densos emplazados a niveles corticales profundos, (2) una sobredensificación de la corteza inferior, o bien (3) una anomalía en la geometría de la corteza, ya sea por el efecto de una corteza adelgazada por estiramiento, heredada del episodio de rifting cretácico, o por flexión post-mesozoica.

Dado que el espesor cortical de esta región no es lo suficientemente importante (véase Figura 7), se descartan cambios de facies metamórficas que puedan densificar una corteza de <40 km. La posición de esta cuenca respecto a la carga tectónica principal de las Sierras de Córdoba permitiría también descartar un efecto de flexión (véase Dávila, 2008). Dado el indudable origen de *rifting* de las cuencas mesozoicas, la ubicación localizada de estas anomalías sobre los depocentros extensionales cretácicos y considerando que la geometría de la interfase corteza-manto obtenida por inversión gravimétrica no muestra indicios de antirraíz, es posible que esta anomalía sea una consecuencia de la suma de efectos generados por cuerpos densos emplazados durante la ruptura de corteza y por adelgazamiento de la corteza superior por elongación y fallamiento normal, preservados hasta el presente.

CONCLUSIONES

A partir de un estudio gravimétrico en la región de la cuenca de General Levalle en la Provincia de Córdoba, se obtuvo un modelo gravimétrico 3D con densidad variable hasta el techo del basamento, el cual permitió realizar un análisis del conjunto del área. Se determinó claramente la geometría de la cuenca, que se extiende longitudinalmente en dirección N-S, formando dos marcados depocentros separados en su parte central por una zona de transferencia. El depocentro norte es de menor profundidad, alcanzando los 6.000 metros. El depocentro sur, más profundo que el anterior, se continúa hacia el sur (cuenca de Macachín) y a través de ésta hacia la cuenca del Colorado con conexión al océano Atlántico.

Mediante inversión gravimétrica de la anomalía regional de Bouguer se verificó que la cuenca no posee antirraíz

que compense la columna sedimentaria. Ésto hace pensar que las anomalías positivas obtenidas al descontar el efecto sedimentario de la Anomalía de Bouguer podrían corresponderse con: (1) cuerpos densos emplazados a niveles corticales inferiores, (2) una sobredensificación de la corteza inferior, (3) una anomalía en la geometría de la corteza, ya sea por el efecto de una corteza adelgazada heredada del episodio cretácico o por flexión post-mesozoica, generando que niveles más densos del manto puedan ocupar cotas donde sería de esperar corteza más liviana. No obstante, las interpretaciones 1 y 3 se ajustan mejor a la geometría de la discontinuidad corteza-manto y a las estimaciones de la composición de la corteza inferior.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica por financiar el trabajo a través del Proyecto PICTR 33060. A los evaluadores Marco Antonio Pérez Flores y Juan García Abdeslem por sus comentarios y sugerencias que mejoraron y clarificaron sustancialmente el trabajo.

REFERENCIAS

- Allen, P.A., Allen, J.R., 1990, Basin Analysis. Principles & Application: Oxford, Blackwell Scientific Publications, 451 pp.
- Álvarez, L.A., Fernández Seveso, F. Pérez, M.A., Bolatti, N.D., 1990, Estratigrafía de la Cuenca Saliniana, en Actas XI Congreso Geológico Argentino, San Juan, 145-148.
- Anderson, M.; Alvarado, P.; Zandt, G. and Beck, S., 2007. Geometry and Brittle Deformation of the Subducting Nazca Plate, Central Chile and Argentina. Geophysical Journal International, 171 (1), 419-434.
- Blakely, R.J., 1995, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications: Cambridge, Cambridge University Press, 441 pp.
- Chebli, G.A., Mozetic, M.E., Rossello, E.A., Bühler, M., 1999, Cuencas Sedimentarias de la Llanura Chacopampeana, en Caminos, P. (ed.), Geología Argentina: Buenos Aires, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales 29, 627-644.
- Chebli, G.A., Spalletti, L., Rivarola, E., De Elorriaga, E., Webster, R., 2005, Cuencas Cretácicas de la Región Central, en Chebli, G., Cortiñas, J., Spalletti, L., Legarreta, L., Vallejo, E. (eds.) Simposio Frontera Exploratoria de la Argentina, VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 193-215.
- Cordell, L., 1985, Techniques, applications, and problems of analytical continuation of New Mexico aeromagnetic data between arbitrary surfaces of very high relief (abstract), en Proceedings of the International Meeting on Potential Fields in Rugged Topography: Suiza, Institute of Geophysics, University of Lausanne, 7, 96-99.
- Costa, C., Gardini, C., Ortiz Suárez, A., Chiesa, J., Ojeda, G., Rivarola, D., Strasser, E., Moda, P., Ulacco, H., Tognelli, G., Carugno, A., Durán, A., Vinciguerra, H., Sales, D., 1999, Hoja Geológica 3366-1, San Francisco. Programa Nacional de Cartas Geológicas, E 1:250.000: Buenos Aires, SEGEMAR, 278, 113 pp.
- Dávila, F.M., 2008, The modern Pampean Plain foreland basin system at 31°S: Depozones controlled by crystalline basement thrusting?, en Congreso Geológico Argentino, Jujuy, Actas en CD.
- Dávila, F.M., Astini, R.A., Jordan, T.E., 2005, Cargas subcorticales en el antepaís andino y la planicie pampeana: Evidencias estratigráficas,

- topográficas y geofísicas: Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60, 775-786.
- Dávila, F.M., Lithgow-Bertelloni, C., 2008, Dynamic topography during flat-slab subduction: a first approach in the south-central andes, *en* 7th International Symposium on Andean Geodynamics, Nice, Francia. C.D.
- Dávila, F.M., Lithgow-Bertelloni, C., Gimenez, M., 2010, Tectonic and dynamic controls on the topography and subsidence of the Argentine Pampas: The role of the flat slab: Earth and Planetary Science Letters, 295, 187-194.
- Fraga, H., Nocioni, A., 1987, Estudio de la subsidencia en las Cuencas de Santa Lucía (Uruguay), Macachín y Laboulaye (Argentina), mediante diagramas Tiempo-Profundidad, *en* X Congreso Geológico Argentino: San Miguel de Tucumán, Actas 2, 301-304.
- Franzese, J.R., Spalletti, L.A., Gómez Pérez, I., MacDonald, D., 2003, Tectonic and palaeoenvironmental evolution of Mesozoic sedimentary basins along the Andean foothills of Argentina (32° - 54° S): Journal of South American Earth Sciences, 16, 81-90.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., Gregory, R., 1974, Formation velocity and Density-The Diagnostic Basis for Stratigraphic Traps: Geophysics, 39, 770-780.
- Gilbert, H., Beck, S., Zandt, G., 2006, Lithospheric and upper mantle structure of Central Chile and Argentina: Geophysical Journal International, 165, 383-398.
- Gimenez, M.E., Braitenberg, C., Martínez, P., Introcaso, A., 2009, A Comparative analysis of Seismic and Gravimetric Crustal Thicknesses below the Andean Region with flat Subduction of the Nazca Plate: International Journal of Geophysics, ID 607458, 8 pp.
- Gómez-Ortiz, D., Agarwal, B.N.P., 2005, 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm: Computers & Geosciences, 31, 513-520.
- Hager, B.H. 1984, Subducted slabs and the geoid: constraints on mantle rheology and flow: Journal Geophysical Research, 89(B7), 6003-6015.
- Ingersoll, R.V., Busby, C.J., 1995, Tectonics of sedimentary basins, *en* Busby, C.J., Ingersoll, R.V. (eds.), Tectonics of Sedimentary Basins: Oxford, Blackwell Science, 1-51.
- Introcaso, A., Huerta, E., 1972, Perfil gravimétrico transcontinental sudamericano (32°S): Revista Geofísica, I.P.G.H., 21(22), 133-159.
- Introcaso, A., Pacino, M.C., Fraga, H., 1992, Gravity, Isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30° S y 35° S: Tectonophysics, 205, 31-48.
- Introcaso, A., Martínez, M.P., Gimenez, M., 2006, Interpretación de paleosubducciones en la región de Sierras Pampeanas Orientales a partir de información gravimétrica, *en*: XIII Reunión de Tectónica, San Luis, CD.
- Lyngsie, S.B., Thybo, H., Lang, R., 2007, Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intracratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine: Journal Geophysical Research, 112, B12402, doi:10.1029/2006JB004795.
- Jacques, J., 2003, A tectonostratigraphic synthesis of the Sub-Andean basins: inferences the position of South American intraplate accommodation zones and their control South Atlantic opening: Journal of the Geological Society, 160, 703-717.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., 1996, El magmatismo cretácico de las sierras de Córdoba y sus implicancias tectónicas, *en* 13° Congreso Geológico Argentino y 3er Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas (3), 453-464.
- Kostadinoff, J., Llambías, E.J., 2002, Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la provincia de La Pampa, *en* 5 Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, CD, 9 pp.
- Marengo, H.G., 2006, Micropaleontología y estratigrafía del Mioceno marino de la Argentina: Las Transgresiones de Laguna Paiva y del "Entrerriense-Paranense", Tomo I: Argentina, Universidad de Buenos Aires, Tesis doctoral, 124 pp.
- Miranda, S., Introcaso, A., 1999, Cartas gravimétricas de la provincia de Córdoba, República Argentina: interpretación de la estructura profunda de la Sierra de Córdoba: Argentina, Universidad Nacional de Rosario, Temas de Geociencia, 1, 45 pp.
- Mitrovica, J.X., Beaumont, C., Jarvis, G.T., 1989, Tilting of the continental interior by the dynamical effects of subduction: Tectonics, 8, 1079-1094.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., Reich, M., 2005, Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, northern Chile: Implications for the tectonic evolution of the Central Andes: Tectonophysics, 399, 125-154, doi: 10.1016/j.tecto.2004.12.019.
- Pacino, M.C., Introcaso, A., 1988, Modelo gravimétrico sobre el sistema de subducción Placa de Nazca Sudamericana en la latitud 33° Sur, *en* V Congreso Geológico Chileno, T2, 77-89.
- Parker, R.L., 1973, The rapid calculation of potential anomalies: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31, 447-455.
- Popowski, T., Connard, G., French, R., 2006, GMSYS-3D: 3D Gravity and Magnetic Modeling for OasisMontaj-User Guide: Corvallis, Oregon, Northwest Geophysical Associates, Inc.
- Ramos, V.A., 1996, Evolución tectónica de la plataforma continental, *en* Ramos, V.A., Turic, M.A. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina. Relatorio XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos: Buenos Aires, Asociación Geológica Argentina, Instituto Argentino del Petróleo, 385-404.
- Ramos, V.A., 1999, Evolución tectónica de la Argentina, *en* Caminos, R., (ed.): Geología Argentina: Buenos Aires, Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR, Anales, N° 29, 715-784.
- Rivarola, D., Spalletti, L.A. 2006, Modelo de sedimentación continental para el rift cretácico de Argentina Central. Ejemplo de la Sierra de las Quijadas, San Luis, Argentina: Revista Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, 61, 63-80.
- Rossello, E.A., Mozetic, M.E., 1999, Caracterización estructural y significado geotectónico de depocentros cretácicos continentales del centro-oeste argentino, *en* Boletim do 5° Simposio do Cretac do Brasil, 1° Simposio sobre el Cretácico de América del Sur, Serra Negra, 107-113.
- Salso, J.H., 1966, La Cuenca de Macachín, provincia de La Pampa. Nota preliminar: Revista Asociación Geológica Argentina, 21, 107-117.
- Schlische, R.W., 1991, Half-graben filling models: new constraints on continental extensional basin development: Basin Research, 3, 123-141.
- Schmidt, E., Astini, R., Costa, E., Gardini, E., Kraemer, P., 1995, Cretaceous rifting, alluvial fan sedimentation and Neogene inversion, southern Sierras Pampeanas, Argentina, *in* Tankard, A.J., Suárez Soruco, R., Welsink, H.J. (eds.), Petroleum Basins of South America: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62, 341-358.
- Sengor, A.M.C., Burke, K., Dewey, J.F., 1978, Rifts at high angles to orogenic belts: tests for their origin and the Upper Rhine graben as an example: American Journal of Science, 278, 24-40.
- Turcotte, D., Shubert, G., 2002, Geodynamics: Cambridge University Press, 2a ed., 459 pp.
- Uliana, M., Biddle, K., 1988, Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of southern South America: Revista Brasileira de Geociencias, 18, 172-190.
- Uliana, M.A., Biddle, K.T., Cerdan, J., 1989, Mesozoic extension and the formation of Argentine Sedimentary Basins, *en* Tankard, A.J., Balkwill, H.R. (eds.), Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 46, 599-614.
- Urien, E.M., Zambrano, J.J., Martins, L.R., 1981, The basins of southeastern South America (southern Brazil, Uruguay and eastern Argentina) including the Malvinas Plateau and southern South Atlantic paleogeographic evolution, *en* Volkheimer, W., Musacchio, E.A. (eds.), Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur: Buenos Aires, Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", 45-126.

- Urien, C.M., Zambrano, J.J., Yrigoyen, M.R., 1995, Petroleum basins of southern South America: an overview, *en* Tankard, A.J., Suárez Soruco, R., Welsink, H.J. (eds.), *Petroleum Basins of South America*: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62, 63-77.
- Villar, H., 1996, Geochemical Evaluation of the Hunt.Cd.GL x-1 well, General Levalle, Córdoba Province, Argentina. Inédito, Hunt Oil Company, Dallas, 156 pp.
- Watts, A.B., 2001, *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*: Cambridge University Press. 458 pp.
- Webster, R.E., Chebli, G.A., Fischer, J.F., 2002, La Cuenca General Levalle, Argentina: un Rift del Cretácico Inferior en el Subsuelo, *en* V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: Instituto Argentino del Petróleo y el Gas, Mar del Plata, Editado en CD.
- Webster, R.E., Chebli, G.A., Fischer, J.F., 2004, General Levalle Basin, Argentina: a Frontier Lower Cretaceous Rift Basin: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Tulsa, 88, 627-652.
- Woollard, G.P., 1969, Regional variations in gravity, *en* *Pembroke, J.H. (ed.), The Earth's Crust and Upper Mantle: Structure, dynamic processes, and their relation to deep seated geological phenomena*: Washington, D.C., American Geophysical Union, Geophysical Monograph 13, 320-341.
- Ziegler, P.A., Cloetingh, S., 2004, Dynamic processes controlling the evolution of rifted basins: *Earth Science Reviews*, 64, 1-50.
- Manuscrito recibido: Marzo 23, 2010
Manuscrito corregido recibido: Octubre 20, 2010
Manuscrito aceptado: Octubre 27, 2010