

# Caracterización geofísica de la cuenca de Pipanaco Catamarca - Argentina

Mario E. Gimenez<sup>\*1</sup>, David Gómez Ortíz<sup>2</sup>, Patricia Martínez<sup>1</sup> y Antonio Introcaso<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CONICET. Instituto Geofísico Sismológico Volponi. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Ignacio de La Roza y Meglioli. S/N. Rivadavia. San Juan Argentina. CP 5400. mgimenez@unsj-cuim.edu.ar

<sup>2</sup> Universidad Rey Juan Carlos. david.gomez@urjc.es

<sup>3</sup> CONICET. Instituto de Física de Rosario. Universidad Nacional de Rosario. geofisic@fceia.unr.edu.ar

Recibido enero 2014, revisión aceptada mayo 2014

## ABSTRACT

This work is focused on the Pipanaco basin area, which straddles two provinces: Catamarca and La Rioja (Argentina), and is located within the Sierras Pampeanas mountain range. The region features a tectonic depression bound by inverse faults (except its southern border). Existing gravimetric and geological information have been combined with new gravity data to model crustal features beneath the basin.

Gravity anomaly maps were prepared using land gravity stations. Crustal-related anomalies were enhanced following a residualization process in order to identify density inhomogeneities located in the upper crust, which is the main focus of this study. Then, 2-D and 3-D density models of the upper crust were prepared from the residual Bouguer anomaly. The density of these models reveals that the sedimentary basin reaches a maximum depth of 3km of Neogene age sediments. Moreover, nonoutcropping, highdensity bodies were also identified, whose origin would go back to the evolutionary stage of the central Andes, and originated in a rifting process during the early Carboniferous.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca de Pipanaco, cuya superficie forma parte de las provincias de Catamarca y La Rioja, de Argentina, se ubica en una zona prácticamente llana, en la gran depresión intermontana que limita al este con la Sierra de Ambato, al sur con la Sierra de Velasco, al oeste con la Sierra de Vinquis, Sierra de Zapata y Sierra de Fiambalá y al norte con la Sierra de Belén y la Sierra Capillitas. Está ubicado entre los 66° 30' y 67° de longitud oeste, y entre los 27° 30' y 28° 30' de latitud sur, perteneciendo al ámbito de la Provincia Geológica de las Sierras Pampeanas. Esta cuenca presenta rasgos de una depresión tectónica característica de valles intermontanos de Sierras Pampeanas (e.g., Baldis, *et al.* 1990; Caminos, R. 1979; Fernández Seveso, *et al.* 1990; Zambrano, 1990, Azeglio, *et al.* 2011). Socic *et al.* (1973) interpretan que los bordes de la cuenca, con excepción del austral, están marcados por fallas inversas de alto ángulo que han elevado y empujado hacia el centro bloques del basamento (ver Fig. 1).

En el presente trabajo hemos caracterizado la distribución de densidad de la corteza superior (donde se ubica la cuenca de Pipanaco y las sierras vecinas) a través de la información geológica y geofísica existente, específicamente datos de gravedad ('g') y altitud ('h') del Instituto Geográfico Nacional Argentino,

sumada a las mediciones gravimétricas recientemente realizadas en la región de estudio.

En el área de estudio hay pocos antecedentes geofísicos: un estudio de refracción sísmica (YPF S. A. inédita) muestra velocidades promedio de 2,8 km/s, para el relleno sedimentario de 2300 m de potencia, ubicados sobre un refractor de 5,5 km/s.

En la región del Valle de La Rioja, al este de la sierra de Velasco y sur de Pipanaco, Fisher *et al.* (2002) interpretaron las secciones sísmicas 2D registradas por YPF y las refracciones profundas.

En la misma región Mamaní *et al.* (2002) registraron e interpretaron sondeos de mangetotéluricos y Giménez *et al.* (2009), utilizando esta información sísmica y de MT, modelaron gravimétricamente la cuenca del valle de La rioja con densidades para los sedimentos de 2,32 g/cm<sup>3</sup>.

La actividad sísmica actual señala un significativo incremento de la distribución de epicentros en el centro y norte de la Cuenca. Eremchuk (1984) señaló que existe una clara relación sismotectónica revelada por una reactivación de planos de fractura y por dislocaciones en forma de escarpa de fallas, en un factible régimen compresivo.

Dahlquis *et al.* (2010) realizaron un estudio de datos isotópicos (Rb-Sr y Sm-Nd) en plutones de edad Carbonífera superior, en la región de las Sierras Pampeanas orientales, confirmando la existencia de granitos Tipo A, que representan mezclas variables de manto astenosférico y corteza continental, con diferentes

\* mgimenez@unsj-cuim.edu.ar

mezclas que producen diferentes subtipos de granitos. Por otro lado, Dávila *et al.* (2012) enfocaron el estudio de la región que contiene a la cuenca de Pipanaco mediante un análisis regional, basado en correlaciones estratigráficas, flexión elástica y reconstrucciones isostáticas, que indicaría que la carga dinámica provocó un episodio de subsidencia regional del orden de los 2 km durante el Mioceno-Plioceno. Por otro lado, estos autores sugieren que procesos geodinámicos litosféricos podrían explicar el levantamiento topográfico en el que se encuentra esta región de la cuenca, de manera similar a la que propone Strecker *et al.* (2009) para el norte de las Sierras Pampeanas.

El presente trabajo se enfoca en analizar la cuenca de Pipanaco con el fin de entender su geometría y vinculación con

las sierras vecinas y producir un modelo gravimétrico que refleje la realidad geológica.

## MARCO GEOLÓGICO

La cuenca de Pipanaco se ubica dentro del ámbito de las Sierras Pampeanas. Estas sierras presentan un basamento cristalino constituido por esquistos, migmatitas, metamagmatitas y magmatitas, el cual fue elevado hacia la superficie. Las metamagmatitas derivan de intrusivos básicos y ultra básicos emplazados con anterioridad a los procesos de metamorfismo regional y las rocas magmáticas son de composición granítica, granodiorítica y tonalítica (Sosic *et al.* 1973).

El levantamiento más reciente del basamento ocurrió hace 10 millones de años, cuando la placa de Nazca subductada experimentó un cambio en el ángulo de descenso dentro de la astenósfera. Antes de esto, se estimaba que descendía por debajo de los Andes y Sierras Pampeanas con un ángulo de aproximadamente 30°. La historia de la actividad volcánica a las latitudes de Sierras Pampeanas indica que el ángulo de descenso de la placa de Nazca era significativamente mayor. En tiempos posteriores su ángulo de descenso ha disminuido hasta alcanzar su actual trayectoria subhorizontal por debajo de Sierras Pampeanas (Jordan y Allmendinger, 1986).

Existen muy pocos antecedentes relacionados con la cuenca de Pipanaco, en este sentido la contribución más detallada se encuentra en Sosic *et al.* (1973). Desde el punto de vista geológico, la zona estudiada muestra en gran medida las características del ambiente Sierras Pampeanas, es decir, se distinguen bloques de basamento cristalino constituidos principalmente por rocas graníticas y en menor escala por migmatitas y rocas metamórficas inyectadas en distinto grado. Los granitos predominan en las sierras de Velasco, Vinquis y Zapata. En la sierra de Copacabana se observan rocas migmatíticas y metamórficas (Sosic *et al.* 1973), ver ubicación en Fig. 1b.

Las estructuras que se observan en las sierras que rodean la cuenca de Pipanaco son el resultado de acontecimientos tectónicos ocurridos desde el Precámbrico hasta el Terciario superior a Cuaternario inferior, reconociéndose estructuras típicas de Sierras Pampeanas, caracterizadas por bloques de basamento levantados por fallas inversas de alto ángulo (e.g., González Bonorino, 1950; Jordan - Allmendinger, 1986).

La sierra de Zapata exhibe dos fallas subparalelas; una la separa de la sierra de Vinquis y la otra corre algo más al oeste; se las reconoce en su recorrido por las fajas de granito alterado en material caolínico (Sosic *et al.* 1973).

En el borde oriental de la sierra de Vinquis se distinguen dos dislocaciones que corren más o menos paralelas, de rumbo aproximadamente meridional, que dieron origen a otros tantos escalones en el macizo cristalino. El extremo sur de este cordón montañoso se halla cortado por una línea tectónica que coincide con el cauce del río Colorado.

La región de la cuenca de Pipanaco forma parte de una extensa cuenca sedimentaria intermontana, colmada por sedimentos

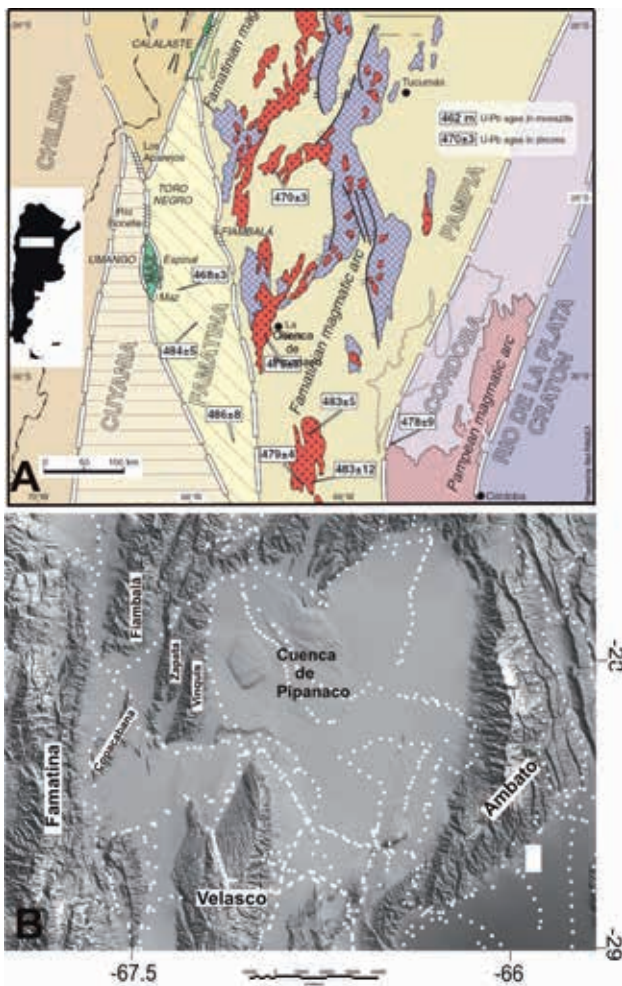


FIGURA 1

a) Ubicación del área de estudio en el marco geológico regional donde se localiza (extraído y modificado de Ramos, 2009). Con líneas de trazos se identifican los principales terrenos, y los nombres de los mismos en caracteres abiertos. Las edades se expresan en Ma. b) Modelo de elevación digital del terreno donde se ubican las principales estructuras orogénicas visibles del área de estudio, y en puntos blancos se indica la distribución de las mediciones de gravedad y GPS.

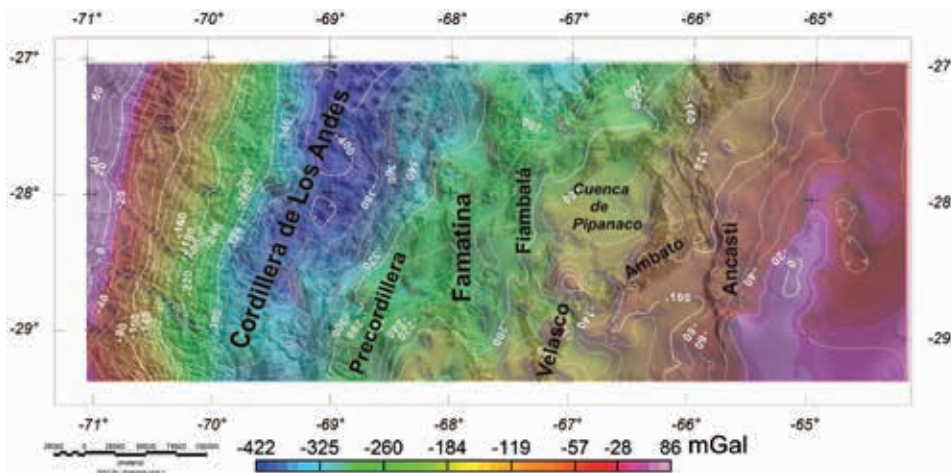


FIGURA 2

Carta de isoanómalas de Bouguer, con equidistancia de 20 mGal, sobre un modelo de elevación digital del terreno en el que se indican las principales estructuras geológicas de la región.

modernos. La amplia depresión abarca cerca de 10.000 km<sup>2</sup> y estaría constituida por una serie de escalones tectónicos de basamento cristalino, con sedimentos terciarios o más antiguos quizás, superpuestos y cubiertos a la vez por sedimentos cuaternarios, rígidos por fallas de tipo inverso de orientación aproximada norte-sur, las cuales dan un perfil de graderías de este a oeste (Socic *et al.* 1973).

## METODOLOGÍA

Se realizó un relevamiento gravimétrico y altimétrico sobre el área de la cuenca de Pipanaco y zonas vecinas. Las determinaciones gravimétricas se efectuaron con un gravímetro Scintrex autograv CG3, realizando controles de rutina propios en los relevamientos gravimétricos para controlar la estabilidad del instrumento. Dichos valores de gravedad fueron vinculados al valor fundamental de Buenos Aires (estación Miguelete: 979690,03 mGal). Las mediciones gravimétricas fueron referidas al IGSN71 (Internacional Gravity Standardization Net 1971) (Morelli *et al.* 1974). En cada estación gravimétrica se determinó la altura elipsoidal referida al WGS84, utilizando dos GPS de doble frecuencia. En el campo se dispuso de un equipo base y otro móvil con un radio máximo de 20 km de separación. Ambos equipos registraron en modo diferencial.

En cuanto al procesamiento de los datos de gravedad, se calcularon en base a las clásicas expresiones:

$$\text{AAL (mGal)} = \text{gobs} - (\gamma_0 - \text{CAL}) \quad (1)$$

$$\text{AB (mGal)} = \text{gobs} - (\gamma_0 - \text{CAL} + \text{CB} + \text{CT}), \quad (2)$$

Siendo:

AAL: Anomalía de Aire Libre

AB: Anomalía de Bouguer

gobs: Gravedad Observada

$\gamma_0$ : Gravedad Normal a la latitud de la estación

CAL: Corrección de Aire Libre

CB: Corrección de Bouguer

CT: Corrección topográfica, considerando las zonas de Hayford hasta una distancia de 167 km.

Para la Corrección de Aire Libre se adoptó el gradiente vertical normal 0,3086 mGal/m, en tanto que para la Corrección de Bouguer se asume una densidad de 2,67 g/cm<sup>3</sup> (Hinze, 2003) de modo que:

$$\text{CB [mGal]} = 0,0419\sigma h = 0,1119.h \quad (3)$$

Con h: altura sobre el nivel medio del mar en metros.

A esta información procesada se le adicionó la información existente en la base de datos del Instituto Geofísico Sismológico Volponi de la Universidad Nacional de San Juan y del Instituto de Física de Rosario de la Universidad Nacional de Rosario para construir una carta con información regional. Los valores medidos fueron regularizados mediante la técnica de mínima curvatura en grillas regulares 5 km x 5 km. En la Fig. 1b, se puede ver la distribución de estaciones de gravedad y de posicionamiento GPS medidas en la zona de estudio.

## MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE ANOMALÍAS

La anomalía de Bouguer de la Fig. 2 contiene la suma de los efectos gravimétricos y es interés de este trabajo poder separarlos para obtener longitudes de onda cortas, vinculadas con las estructuras geológicas situadas en la corteza superior.

Existen numerosas técnicas que permiten una adecuada separación de los efectos gravimétricos. A los valores de la anomalía de Bouguer se les aplicaron diferentes técnicas: frecuenciales, pasa bandas y de prolongación ascendente a diferentes alturas respecto de la altura geoidal. Pero, por estar tan influenciados por la potente raíz andina, el filtro que resultó ser más eficiente fue el obtenido mediante el filtro Butterworth en una ventana de 250 km y orden 8 (Blakely, 1995). En Fig. 3 se presenta la carta de anomalía residual de Bouguer.

## DECONVOLUCIÓN DE WERNER

El fundamento de esta técnica de inversión es la ubicación automática de soluciones a fuentes de anomalías de forma y dimensiones sencillas (diques y contactos). Esto se logra corriendo ventanas de

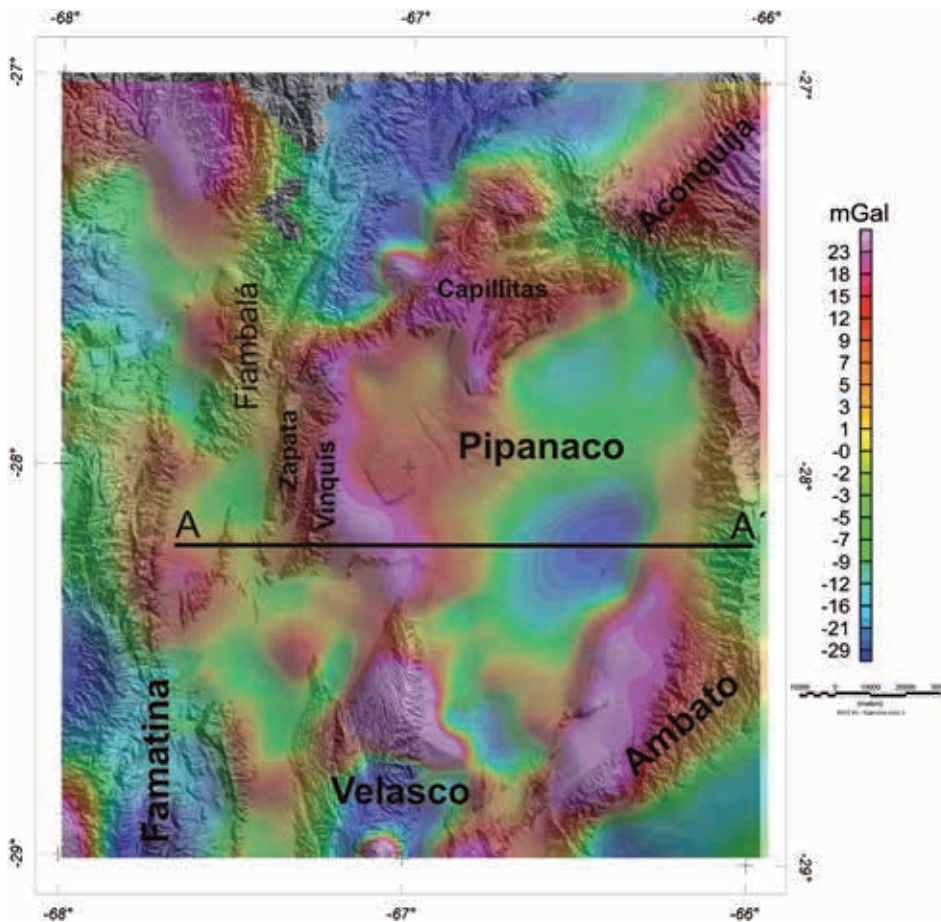


FIGURA 3  
Carta de Anomalía residual de Bouguer sobre un modelo de elevación digital del terreno. Se indica la sección A-A' de dirección O-E sobre la que se realizará un modelo gravimétrico 2D.

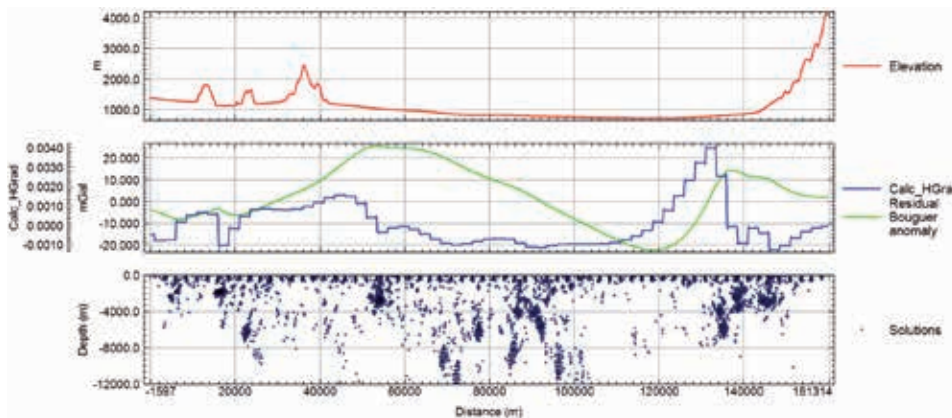


FIGURA 4  
Deconvolución de Werner aplicada a los datos de gravedad en la sección A-A'. En la parte superior se observa el perfil topográfico, en el centro la anomalía residual de Bouguer y el gradiente horizontal de la anomalía. Y abajo, las soluciones de la deconvolución de Werner.

distintos anchos a lo largo del perfil de anomalías. En cada ventana se analiza la señal gravimétrica desde un mínimo de 4 ecuaciones que involucran la gravedad observada, la resolución matricial de las ecuaciones para diques y contactos, y resulta en la determinación de las coordenadas, profundidades y densidades relativas de una fuente por ventana. Finalmente se grafican todas las soluciones y los resultados más robustos se consiguen en los nidos de soluciones sobre contactos y fallas que permiten interpretar la ubicación de las estructuras de interés geológico.

El método de deconvolución de Werner es una técnica ágil para analizar datos del campo potencial en 2D. Su principal utilidad la brinda la conveniencia de analizar grandes volúmenes de datos en forma rápida, permitiendo el reconocimiento automático de las profundidades y ubicaciones de las fuentes que producen las anomalías, como en este caso las gravimétricas (Werner, 1953; Ku and Sharp, 1983; Kilty, 1983; Hansen and Simmonds, 1993).

Se evaluó la deconvolución de Werner en el perfil A-A' (ver Fig. 3). La ventana de búsqueda se limitó entre los 500 m y los

8000 m de ancho y hasta los 12.000 m en profundidad. Los resultados de ésta técnica se pueden ver en Fig. 4.

### RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En la carta de anomalías de Bouguer (Fig. 2) se observa un marcado gradiente negativo debido a la influencia de la raíz andina. Como la zona de interés del presente trabajo se ubica dentro de esta tendencia regional negativa, es necesario descontar este efecto gravimétrico regional para obtener las anomalías que responden a heterogeneidades ubicadas en corteza superior y así lograr una interpretación de la estructura bajo estudio. La anomalía residual resultante se puede ver en Fig. 3. En ella se observa que dentro de la cuenca de Pipanaco las mayores anomalías negativas, que se corresponderían con mayores espesores sedimentarios, se observan en la región al sureste de la cuenca, flanqueadas por estructuras de mayor densidad (algunas visibles y otras no) que ocasionan una respuesta gravimétrica positiva.

Los resultados de la deconvolución de Werner se observan en Fig. 4, donde se graficaron en la parte inferior las soluciones de Werner que justifican el gradiente gravimétrico y en la parte superior la anomalía residual de Bouguer y el gradiente horizontal.

En todos los casos se prefijó un error máximo en la ubicación de las soluciones de la deconvolución de Werner en un valor menor o igual a 1 km. Estos nidos de soluciones estarían indicando la ubicación de las fuentes anómalas que generan las anomalías positivas observadas.

En la Fig. 4 se presentan la sección A-A' con las soluciones de la deconvolución de Werner. Se puede correlacionar los nidos de soluciones con los altos gradientes de la anomalía residual de Bouguer. Esta técnica ayuda a identificar estructuras geológicas, algunas no visibles desde superficie. Por ejemplo, en este estudio los nidos de soluciones estarían indicando la ubicación de cuerpos de mayor densidad, que generan respuestas gravimétricas positivas en el oeste de la cuenca de Pipanaco.

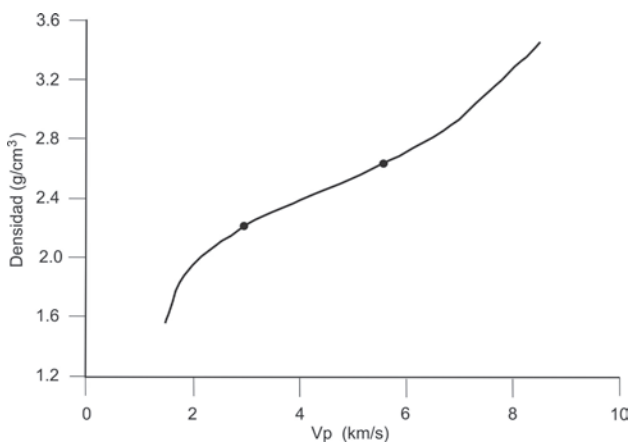


FIGURA 5  
Relación de densidad versus velocidad de onda p, calculada a través de la relación expresada por Brocher *et al.* (2005).

### MODELO DE INVERSIÓN GRAVIMÉTRICA 3D

Se realizó un modelo gravimétrico 3D del basamento mediante un software desarrollado por Popowski *et al.* (2006). El modelo "geológico" de referencia consiste en un modelo simple con densidad fija, obtenida a partir de las velocidades promedio de los perfiles sísmicos de refracción profundos realizados en el sur de la cuenca de Pipanaco y en la cuenca del Valle de La Rioja por la empresa de hidrocarburos YPF S. A. Las velocidades fueron convertidas a densidad a través de la expresión de Brocher *et al.* (2005), resultando para la cobertura sedimentaria una densidad promedio de 2,37 g/cm<sup>3</sup> y para el basamento una densidad promedio de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. En la Fig. 5 se presenta la relación velocidad-densidad basada en Bocher *et al.* (2005). El modelo de basamento obtenido por inversión gravimétrica de la anomalía residual de Bouguer se presenta en Fig. 6. Se destaca que en el área correspondiente a la cuenca de Pipanaco la mayor potencia sedimentaria se ubica en su borde este, con una profundidad máxima de 3 km, y flanqueada por altos de basamentos que responden a cuerpos de mayor densidad.

### MODELO GRAVIMÉTRICO 2D

Se realizó un modelado bidimensional de una sección W-E, indicada con A-A' en la Fig. 3, que justifica la anomalía residual de Bouguer, utilizando un software basado en Webring, 1985. En la Fig. 7 (parte inferior) se presenta el modelo de corteza que justifica la anomalía residual de Bouguer. Las densidades utilizadas en este modelo fueron: una primera capa de sedimentos de baja densidad (Cuaternarios), de 2,2 g/cm<sup>3</sup>, por debajo de ésta una

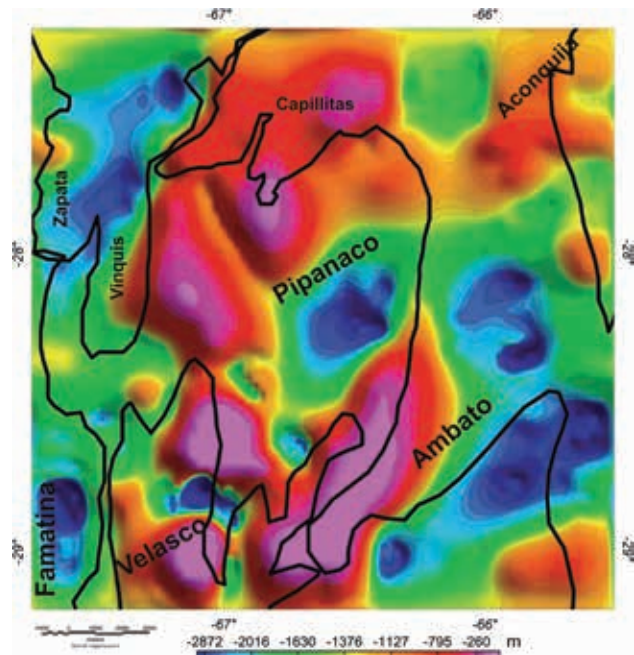


FIGURA 6  
Geometría del basamento obtenida por inversión gravimétrica de la anomalía residual de Bouguer.

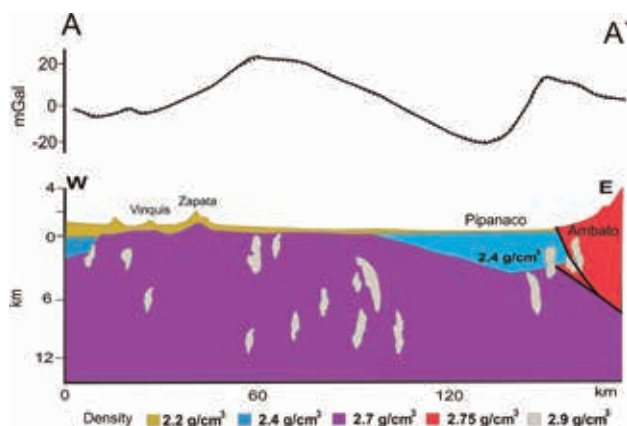


FIGURA 7

Modelo de corteza superior sobre la sección A-A' cuya respuesta gravimétrica justifica la anomalía residual de Bouguer.

capa de sedimentos de  $2,4 \text{ g/cm}^3$ , el basamento con una densidad de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  y para la Sierra Pampeana de Ambato se consideró una densidad de  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , basada en datos de otras Sierras Pampeanas (Giménez *et al.* 2000; Martínez y Giménez, 2003; Introcaso *et al.* 2004; entre otros), y para lograr el ajuste fue necesario incorporar cuerpos con densidad  $2,9 \text{ g/cm}^3$ , basados en las soluciones de la deconvolución de Euler y principalmente de Werner, que permitieron el ajuste de la anomalía calculada respecto a la residual de Bouguer.

En el modelo de corteza superior resultante para la cuenca de Pipanaco alcanza una profundidad de 3 km desde el nivel topográfico y un ancho de 50 km.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis gravimétrico en la región donde se ubica la cuenca de Pipanaco permitió determinar regiones con altos y bajos gravimétricos vinculadas con inhomogeneidades de densidades ubicadas en la corteza superior. Los bajos gravimétricos están asociados con depresiones sedimentarias, como la de la cuenca de Pipanaco, que presenta una profundidad máxima de 3 km. Por el contrario, los altos gravimétricos, asociados a cuerpos densos de origen mantélico, se explicarían mediante un modelo integrado de evolución geológica de los Andes Centrales que se iniciaría con un rift en el Carbonífero. Esto que permitió el emplazamiento de cuerpos graníticos de tipo A con contaminación mantélica y hoy ubicados en la corteza superior (Astini *et al.* 2009).

Del estudio gravimétrico realizado en la cuenca de Pipanaco y zonas aledañas se elaboraron modelos de corteza superior que justifican la anomalía residual de Bouguer, pudiéndose determinar que la cuenca sedimentaria alcanzaría una profundidad máxima de 3 km y un ancho de 50 km. Los cuerpos densos podrían correlacionarse con los resultados isotópicos obtenidos por Dahlquist *et al.* (2010), que sugieren la presencia de participación mantélica en la generación de los magmas parentales de las rocas félsicas. El modelo que estos autores proponen supone la fusión

de la litósfera continental durante el Carbonífero temprano en el ámbito de Sierras Pampeanas, emplazándose numerosos cuerpos graníticos de tipo A que tienen contaminación mantélica, lo cual implica que a nivel regional hubo un ascenso astenosférico que se podría explicar a través de rifting, cuya configuración desapareció con el acortamiento sanrafaélico. Estos cuerpos densos podrían ser remanentes de material astenosférico (que condujo a la fusión de la litósfera continental) que produjo los magmas graníticos que hoy están expuestos en superficie y que observamos con respuestas de gravedad positiva. Este proceso geológico podría ser justificado a través de la propuesta de Astini *et al.* (2009), quienes presentan un modelo integrado de la evolución de los Andes Centrales desde la etapa de rifting en el Carbonífero Temprano hasta el Pérmico Tardío. Se basan en buenas evidencias geológicas, que interpretan a través de un estiramiento cortical con bloques rotados del basamento, sedimentación de entorno de rift y adelgazamiento asociado con magmatismo basandesítico y riolítico diferenciado (que implica que un residuo más básico quedó ubicado a mayores profundidades) y que en la actualidad se ubica en corteza superior.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las valiosas sugerencias realizadas por los revisores, como así también del cuerpo Editorial, que permitieron mejorar sustantivamente el presente trabajo. El trabajo fue financiado por el proyecto 21E/882 CICITCA, Universidad Nacional de San Juan.

## BIBLIOGRAFÍA

- Astini, R.A., F. Martina, F. M. Ezpeleta, F. Dávila, and Cawood, P. A. [2009] Chronology from rifting to foreland basin in the Paganzo Basin (Argentina), and a reappraisal on the Eo- and Neohercynian, *XII Congreso Geológico Chileno*, 23-26 Noviembre, 2013, Santiago.
- Azeglio, E., M. E. Giménez and A. Introcaso. [2011] *Estudio Geofísico y Tectónico de la Cuenca de Las Salinas*. Editorial Académica Española.
- Baldís, B., R. Martínez, C. Villegas, E. Pereyra, y Perez M. [1990], Estructura, Provincialismo Geológico y Unidades Tectonoestratigráficas. *XI Congreso Geológico Argentino*, 17-20 Septiembre, 1990, San Juan. Relatorio de geología y Recursos Naturales de la provincia de San Juan, 186-211.
- Blakely, R., [1995] *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Briggs, I.C., [1974] Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**, 39-48.
- Brocher, M. [2005] Empirical relations between elastic wave speeds and density in the earth's crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 2081-2092.
- Caminos, R. [1979] Sierras Pampeanas Noroccidentales Salta, Tucuman, Catamarca, La Rioja y San Juan. II Simposio de Geología Regional Argentina: Córdoba, Academia Nacional de Ciencias, I, 225-291
- Dahlquist, J.A., P. Alasino, G. N. Eby, C. Galindo, and Casquet C. [2010] Fault controlled Carboniferous A-type magmatism in the proto-Andean foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): Geochemical constraints and petrogenesis. *Lithos*, **115**, 65-81.
- Eremchuck, J. E. [1984] Fracturas del Borde Occidental de las Sierras de Ambato - Manchao, Provincia de Catamarca. Noveno Congreso

- Geológico Argentino. Bariloche. *Actas II*, 362-367.
- Fernández Seceso, F. M. A. Perez, y Álvarez, L. A. [1990] Análisis Estratigráfico del Ámbito Occidental de la Cuenca de Paganzo en el Rango de Grandes Ciclos Depositacionales. *XI Congreso Geológico Argentino*. 17-20 Septiembre, 1990, San Juan. *Actas II*, 77-80.
- Fisher, N. D., T. Jordan, and Brown, L. [2002] The Structural and Stratigraphic evolution of La Rioja Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, **15**, 141-156.
- Gardner G.H.F., L. W. Gardner, and Gregory, R. [1974] Formation velocity and density – the diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, **39**, 770–780.
- Giménez, M., P. Martínez, and Introcaso, A. [2000] A Crustal Model based mainly on Gravity data in the Area between the Bermejo Basin and the Sierras de Valle Fértil- Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, **13**(3), 275–286.
- Giménez, M., P. Martínez, T. Jordan, F. Ruiz and Lince Klinger, F. [2009] Gravity Characterization of the La Rioja Valley Basin, Argentina. *Geophysics*, **74**(3) B83–B94.
- González Bonorino, F. [1950] Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *RAGA*, (3), 81-110.
- Hansen, R.O. and Simmonds, M. [1993] Multiple source Werner deconvolution. *Geophysics*, **53**, 1792-1804.
- Hinze, W.J. [2003] Bouguer reduction density, why 2.67? *Geophysics*, **68**(5), 1559-1560.
- Introcaso A., P. Martínez, M. Gimenez, and Ruiz, F. [2004] Geophysical study of the Valle Fértil lineament between 28° 45'S and 31° 30'S: boundary between the Cuyania and Pampia terranes. Gondwana Research. *International Association for Gondwana Research, Japan. Special Volume "Cuyania, an exotic block to Gondwana"* **7**(4), 117-1132.
- Jordan T. E. and Allmendinger, R. W. [1986] The Sierras Pampeanas of Argentina: A modern analogue of rocky mountain foreland deformation. *American Journal of Science*, **286**, 737-764.
- Kilty, K.T., [1983] Werner deconvolution of profile potential field data. *Geophysics*, **48**, 234-237.
- Ku, C.C., and Sharp, J. A., [1983] Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modelling. *Geophysics*, **48**(6), 754-774.
- Mamaní, M., B. Castiglione, E. Buk, y Degiuseppe, O. [2002] Determinación del Espesor Sedimentario en la Cuenca al Este de la Ciudad de La Rioja: *21th Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*, Expanded Abstracts, 202 – 207.
- Martínez, P y Giménez, M. [2003] Fuerte anomalía gravimétrica residual positiva en el Sistema de Famatina y su relación con paleosuturas. Explicaciones alternativas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, **58**(2), 176-186.
- Morelli, C., (Ed.) [1974] The International Gravity Standardization Net 1971: International Association of Geodesy, Special Publication 4.
- Popowski T., G. Connard, and French, R. [2006] GMSYS-3D: 3D Gravity and Magnetic Modeling for OasisMontaj - User Guide, Northwest Geophysical Associates, Corvallis, Oregon.
- Ramos, V.A. [2009]. Anatomy and global context of the Andes: main geologic features and the Andean orogenic cycle. In: *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*, (eds) S. Kay, V. Ramos and W. Dickinson. The Geological Society of America, Memoirs 204, 31–65, Geological Society of America, Boulder, CO.
- Socic, M.V.J. [1973] Descripción Geológica de la Hoja 14e, Cuenca de Pipanaco. Provincias de Catamarca y La Rioja. Ministerio de Industria y Minería. Subsecretaría de Minería. Servicio Nacional Minero Geológico. *Boletín*, **137**, 46.
- Webring, M. [1985] SAKI: A Fortran program for generalized linear inversion of gravity and magnetic profiles: USGS Open File Report 85-122.
- Werner, [1953] Interpretation of Magnetic Anomalies at Sheet-like Bodies. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Ser. C, 508.
- Zambrano, J. [1990] Posibilidades de exploración de hidrocarburos. *XI Congreso Geológico Argentino*. 17-20 Septiembre, 1990, San Juan. Relatorio de Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Juan, 316-333.