

RASGOS ESTRUCTURALES EN LA SIERRA PAMPEANA DE VELASCO Y ALREDEDORES A PARTIR DE LOS CAMPOS GRAVIMÉTRICOS Y MAGNETOMÉTRICOS

Marcos A. SÁNCHEZ¹, Silvana L. SPAGNOTTO¹ y Myriam P. MARTINEZ^{1,2}

¹CONICET - IGSV. C.P. 5407. Rivadavia - San Juan.

²FCEfYn - UNSJ. CP: 5400. San Juan. e-mail: marcos.sanchez@conicet.gov.ar

RESUMEN

La región que comprende la sierra de Velasco y el Sistema de Famatina, en el centro-oeste de la Provincia de La Rioja - Argentina, es un área clave para el estudio de la amalgamación de terrenos y tectónica vinculada con el levantamiento andino. En éste trabajo, se definen algunos rasgos de la estructura cortical de ésta región. Para ello, mediante la aplicación de métodos potenciales (gravedad y magnetismo), adecuadamente procesados e interpretados a través de técnicas semiautomáticas y de resalto de anomalías, se logró determinar: a) una región que respondería a la zona de sutura entre los terrenos Famatina y Pampia y b) fallas relacionadas al levantamiento de las sierras de Famatina y de Velasco. Los resultados anteriores se representan en una sección este - oeste en un modelo estructural de bloques de basamento entre Famatina y Velasco, hasta 12 km de profundidad. En él señalamos además la distribución de las fallas y sus buzamientos.

Palabras clave: *Gravedad, magnetismo, deconvolución de Werner, señal analítica, sutura*

ABSTRACT

Structural features of the Sierra Pampeana de Velasco and surrounding areas from gravimetric and magnetometric fields.

The region comprising the Sierra de Velasco and Famatina System, in the center-west of the province of La Rioja in Argentina, is a key area for the study of the tectonic amalgamation of land and linked to the Andean uplift. In this paper, we define some features of the crustal structure of this region. To do this, by applying potential methods (gravity and magnetics), properly processed and interpreted through semiautomatic techniques and rib anomalies, it was determined: a) a region that respond to the suture zone between Famatina and Pampia Terrain b) faults related to the uplift of the Sierras de Famatina and Velasco. The above results are represented in a section east - west in a structural model of basement blocks between Famatina and Velasco, up to 12 km deep. It also noted the distribution of faults and dips.

Keywords: *Gravity, magnetism, Werner deconvolution, analytic signal, suture*

INTRODUCCIÓN

La región de estudio se ubica geográficamente en la provincia de La Rioja, Argentina e incluye la Sierra de Velasco y parte del Sistema de Famatina. Este sistema de sierras, delimitado por fallas, tiene una disposición alargada en sentido predominantemente N - S, y deben su origen a la orogenia andina (Rassmuss 1916, González Bonorino 1950, Ramos *et al.* 2002, Martínez y Gimenez 2003, López *et al.* 2007, Alvarado y Ramos 2011).

La sierra de Velasco pertenece al sistema de las Sierras Pampeanas Noroccidentales (Caminos 1979). El arco magmático de las Sierras Pampeanas Occidentales, así denominado por Ramos (1988, 1999), se diferenciaría del correspondiente a las Sierras Pampeanas Orientales por su edad más joven, cámbrica superior hasta ordovícica media inclusive (515 y 460 Ma.), y se encuentra asociado con el proceso de la subducción activo en el área. Durante el período que se extiende desde el Cámbrico inferior tardío hasta el Ordo-

vífico temprano se inició la subducción en el protomargen de Gondwana y el consecuente magmatismo de arco, evidenciado por los granitoides de arco descriptos en la sierra de Velasco (Lazarte 1987, 1991 y 1992). Dataciones K/Ar de estos granitoides y ortogneises indican edades entre 515 y 470 Ma. (Linares y González 1990). Este tipo de magmatismo se encuentra representado en las sierras de Capillitas, Fiambalá, Ancasti, Ambato, Velasco y en las sierras de Los Llanos (Pankhurst *et al.* 1998, Quenardelle y Ramos 1999) en el

sector de Sierras Pampeanas Occidentales. Además es sincrónico con la subsidencia térmica de la plataforma carbonática de Precordillera, que estaba aislada ya de Laurentia (Astini *et al.* 1996). La máxima y más generalizada actividad magmática de este arco se habría desarrollado entre los 490 y 470 (Lazarte 1992, Rapela *et al.* 1997, 1998, 1999, Sims *et al.* 1998).

La área de interés en este trabajo se compone de bloques de basamento ígneo-metamórfico que fueron deformados durante el Paleozoico inferior, permitiendo el desarrollo de cataclasitas y milonitas que forman fajas de dirección predominante NNO y que se extienden por más de 150 km, denominadas en conjunto Faja Milonítica TIPA (López y Toselli 2007).

Además, Quenardelle y Ramos (1999) propusieron una faja de sutura en la región, debida a la colisión entre el Terreno Pampia y el Terreno Famatina.

Entre los trabajos geofísicos previos, se cuenta con una carta gravimétrica preliminar de la provincia de La Rioja (Martínez *et al.* 2000), luego una carta de mayor detalle de la sierra de Velasco (Martínez *et al.* 2001).

Por otro lado, existen 280 km con líneas sísmicas 2D en el área del Valle de La Rioja, realizadas por la compañía YPF (Fisher *et al.* 2002, Rosello *et al.* 2005). En la figura 1 se presenta un modelo digital de elevación SRTM90 de resolución 90m x 90m obtenido del Shuttle Radar Topography Mission del United States Geological Survey (USGS), indicando la zona de estudio con la ubicación de tales secciones sísmicas, y la sección sísmica 9204 (D) referida más adelante en los resultados obtenidos en este trabajo.

Un perfil a los 29° de latitud sur (Martínez y Gimenez 2003, Martínez *et al.* 2005, 2010), muestra modelos de corteza que incluyen la zona de interés en un contexto de bloques amalgamados en donde las suturas pueden distinguirse a partir de las respuestas gravimétricas diferentes, propias de cada alóctono.

El modelo gravimétrico propuesto en la cuenca del valle de La Rioja (Gimenez *et al.* 2009), propone densidades de contraste entre sedimento y basamento de 0.38 g/cm³, resultando profundidades máximas para los sedimentos de 6 km.

Recientemente, se ha preparado la primera carta magnética de la Sierra de Velasco y alrededores (Sánchez *et al.* 2012).

Con el objetivo de aportar nuevas evidencias que ayuden a definir rasgos tectono-estructurales en esta zona, se presentan resultados de un estudio gravi-magneto-métrico. La aplicación del método semi-automático de Werner nos brinda información sobre la dirección y profundidad de los contactos en dos perfiles trazados en el área de estudio. Finalmente el método de Señal Analítica 2D y 3D, nos permite ratificar los resultados obtenidos.

El tratamiento de datos presentados (en

conjunto) representa una doble evidencia de datos duros en cuanto a la interpretación semi-automática de fallas o lineamientos para esta región.

METODOLOGÍA

En éste trabajo se han compilado nuevas mediciones gravimétricas, magnéticas y altimétricas de precisión, provenientes de distintas fuentes (IGM, IFIR, IGSV) del área de estudio.

Los valores de gravedad se obtuvieron con un Gravímetro automático, marca Scintrex Autograv CG3, con precisión 0.05 mGal.

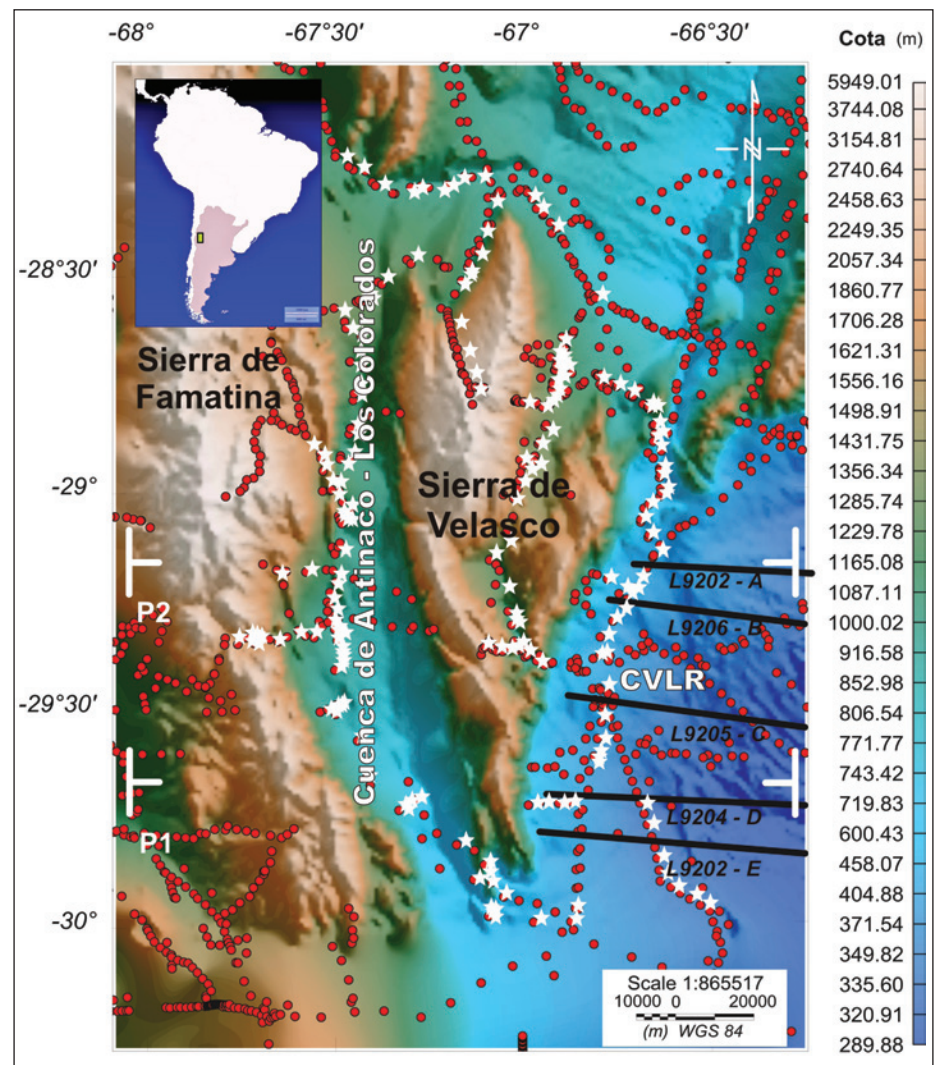


Figura 1: mapa de ubicación geográfica del área de estudio. SRTM90 (90m x 90m). Con líneas negras se indica la ubicación de las líneas sísmicas realizadas por YPF S.A. Con líneas blancas se muestra la ubicación de perfiles utilizados para calcular soluciones con el Método de Werner. (Estrellas: datos magnéticos. Puntos: datos gravimétricos).

Los datos gravimétricos están referidos a la Red Fundamental Mundial IGSN71 (*International Gravity Standardization Network* 1971) (Morelli *et al.* 1974), vinculando la gravedad observada con la estación gravimétrica de Miguelete, Buenos Aires (979690.03 mGal).

Consistentemente, para la gravedad teórica o normal, se utilizó la expresión para el elipsoide Internacional de 1967 (GRS67). La anomalía de Bouguer completa se calcula como la diferencia entre la gravedad teórica y la observada reducida al nivel medio del mar a través de las correcciones clásicas de aire libre (0.3086 h), Bouguer (0.1119 h) con densidad para una losa plana indefinida de 2.67 g/cm³. Para realizar la corrección topográfica se utilizó el modelo de elevación digital del terreno SRTM90 antes indicado.

Por otra parte, las mediciones magnéticas utilizadas en este trabajo son datos de intensidad de campo total (TMI). Estos fueron medidos con un sistema GEM GSM, 19GW V7.0, Overhauser, con precisión absoluta ± 0.1 nT y rango dinámico 10000 - 120000 nT.

El cálculo de las anomalías magnéticas de campo total ΔT se realizó con las expresiones clásicas para estudios regionales.

Así, a fin de obtener anomalías magnéticas de campo cortical, los datos medidos fueron corregidos por: los efectos producidos por variaciones diurnas y los producidos por el campo normal para la fecha de medición (IGRF: *International Geomagnetic Reference Field* 2010).

La corrección diurna del Campo Magnético Total se consiguió utilizando los registros de la Estación Magnética Zonda. Se realizó un ajuste lineal de los registros nocturnos (entre las 0 y 6 hs) para determinar la línea de base nocturna (campo no perturbado). Luego se descontó el valor del Campo Total Normal (IGRF) a cada estación.

Los valores de anomalías para ambos campos potenciales se regularizaron en grillas de 1000 m de separación mediante el método de Mínima Curvatura (Briggs 1974). A partir de los datos regularizados, se prepararon los mapas de anomalías de Bouguer (AB) y de anomalías magnéticas (AM) correspondientes al área de estudio (Figs. 2 y 3).

Por otro lado, como ya se mencionó, ésta es una región sísmica y tectónicamente activa por lo que existe una gran cantidad de sismos en esta región, enunciados por bases de datos mundiales, por ejemplo: <http://earthquake.usgs.gov/earthquake/eqarchives/epic>.

Resultó particularmente interesante el sismo del 28 de Mayo de 2002 (Mw=6,0). Cuyo mecanismo focal, fue consultado primero desde el Harvard Centroid Moment Tensor Catalog (ó simplemente Harvard CMT; <http://www.globalcmt.org/cmtsearch.html>). Según el CMT el mecanismo focal es inverso y posee 2 planos de falla con rumbos (ϕ), buzamientos (α) y slips (λ) de: $\phi_1=180^\circ$, $\alpha_1=19^\circ$ y $\lambda_1=55^\circ$; y $\phi_2=36^\circ$, $\alpha_2=74^\circ$ y $\lambda_2=101^\circ$. La profundidad hipocentral obtenida por este organismo es de 15 km, como veremos más adelante ambos planos de solución son posibles geológicamente.

Luego, Alvarado y Ramos (2011), utilizando estaciones sísmicas de banda ancha que operaron en esta región, han propuesto una nueva determinación para el mecanismo focal de éste sismo, obtenido a partir de modelado de formas de onda y dependiente de la estructura de velocidad sísmica regional.

En la figura 4 (b) se observa el mecanismo focal asociado al sismo del 22 de Mayo de 2002, predominantemente compresivo, con la magnitud del momento Mw=5,8, profundidad hipocentral de 10 km y amplitud del tensor momento sísmico Mo=5,49 10¹⁷Nm. La solución del plano de falla elegida posee rumbo $\phi=36^\circ$, buzamiento $\alpha=56^\circ$ y slips $\lambda=109^\circ$.

Deconvolución de Werner

A fin de estimar profundidades de fuentes gravimétricas y magnéticas en la corteza superior y para el análisis de cambios laterales abruptos en las propiedades de densidad y/o magnetización de las rocas (visto en geofísica como contactos), se utilizó el método de Deconvolución de Werner (Dobrin 1976, Hartman *et al.* 1971). Este método inicialmente fue desarrollado para magnetismo, pero luego se generalizó para el caso gravimétrico.

Werner (1953) presentó una ecuación semi-empírica generalizada para un dique

bidimensional en y (ecuación 1). En ella el valor magnético observado $T(x)$ depende de cuatro incógnitas A y B (cantidades que dependen del tamaño, susceptibilidad y geometría del cuerpo buscado), x_0 (abscisa del punto donde se calcula el magnetismo) y z (profundidad del cuerpo buscado).

$$T(x) = \frac{A(x - x_0) + B_z}{(x - x_0)^2 + z^2}$$

(ecuación 1)

Donde: $T(x)$, A , B , x_0 y z ya han sido descriptas.

El proceso desarrollado por Werner, incluye cuatro incógnitas (A , B , x_0 , z), por lo que debe disponerse de por lo menos cuatro valores observados de T para armar un sistema consistente y encontrar sus valores.

La deconvolución de Werner se calculó sobre los dos perfiles señalados en la figura 1. Se utilizaron ventanas de 5000 m para tener 5 datos como mínimo por ventana para definir anomalías de ≈ 10 km de ancho; el incremento de ancho de ventana utilizado es de 100 m. Los cálculos se resolvieron con ventanas de análisis cada 1000 m (debido a que es la separación de los datos grillados), hasta cubrir todo el perfil en cada caso.

Este método muestra dos tipos de resultados:

1-En verde: diques, cuando la señal de entrada fue la anomalía magnética; y 2- en azul: contactos, cuando la señal a invertir fue el gradiente de la anomalía (Figs. 4 a y b).

Los resultados obtenidos del método de Werner (Figura 4a, izquierda) fueron comparados con los modelos obtenidos a partir de la interpretación de las líneas sísmicas antes citadas (Fisher *et al.* 2002 y Rosello *et al.* 2005).

Señal Analítica

Con el objetivo de determinar límites entre las diferentes unidades geológicas, se aplicó a los datos obtenidos de ambos campos potenciales la metodología propuesta por Nabighian (1972) (ecuación 2). De esta manera se resaltan las anomalías de campo potencial producidas por discontinuidades geológicas de mediana a corta longitud de onda (Salem 2005). Es independiente de la dirección de cualquier

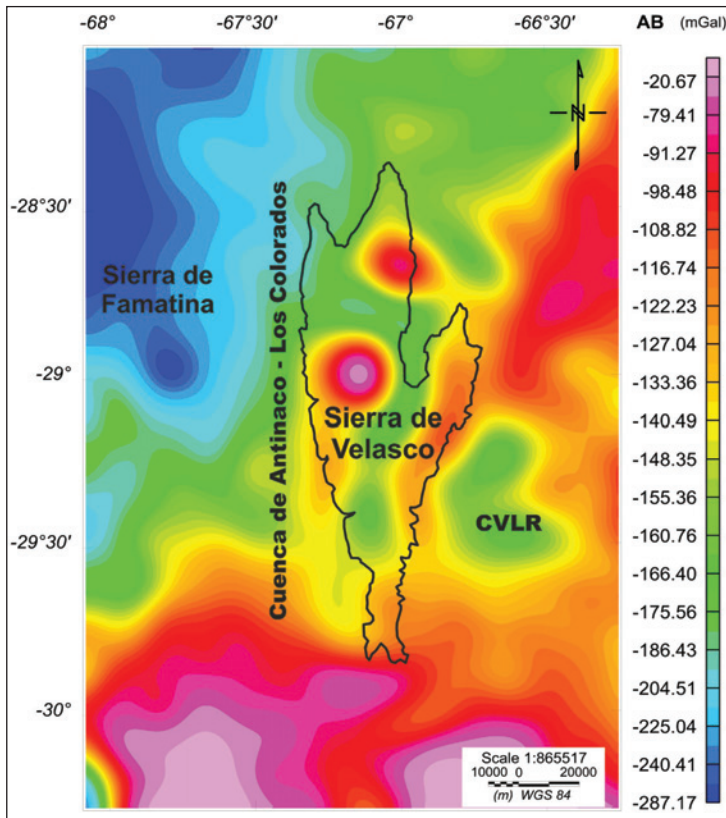


Figura 2: mapa de Anomalías de Bouguer. (CVLR: Cuenca del Valle de la Rioja).

campo potencial (Nabighian 1974, Roest et al. 1992).

La amplitud (valor absoluto) de la señal analítica 3D en un punto puede ser fácilmente derivada del gradiente ortogonal de campo potencial total usando la siguiente expresión:

$$|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{dF}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dF}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dF}{dz}\right)^2}$$

(ecuación 2)

Donde:

A(x, y): Es la amplitud de la señal analítica en .

Es el campo potencial observado en x, y, z.

Correlacionando lo resultados obtenidos, se trazaron perfiles idénticos a los anteriores (P1 y P2) sobre los mapas de Señal Analítica de la figuras 5 a y b.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En términos generales, el mapa de anomalía de Bouguer muestra una gran disminución de los valores de gravedad desde el sur hacia el noroeste, esto se correlaciona con el efecto gravimétrico negativo que provoca la raíz andina, ya que la corteza se engrosa hacia el Oeste. Se observan, además dos máximos en el centro y Norte de la Sierra de Velasco que se corresponderían a las diferentes edades de los dos plutones - Granitos Asha (al norte) y Huaco (al sur) (López *et al.* 2007, Sánchez *et al.* 2011 a y b). Luego, hacia el sector oriental de la Sierra de Velasco y sobre un fondo positivo, se distinguen claramente los límites de la cuenca del Valle de La Rioja.

El mapa de anomalías de Campo Magnético Total, no tiene correspondencia con la carta gravimétrica, por lo menos a simple vista. Debemos recalcar que existen aún pocos datos sobre la Sierra de Velasco.

Sin embargo, cuando se realiza el tratamiento en perfiles aplicando el método de Deconvolución de Werner, advertimos:

- Perfil 1 (Fig. 4a): La anomalía de Bouguer y Magnética (en verde) presentan un cambio significativo hacia el Este y hacia el Oeste a partir de la Cuenca de Antinaco – Los Colorados, existiendo un elevado gradiente positivo hacia el Oeste, indicando

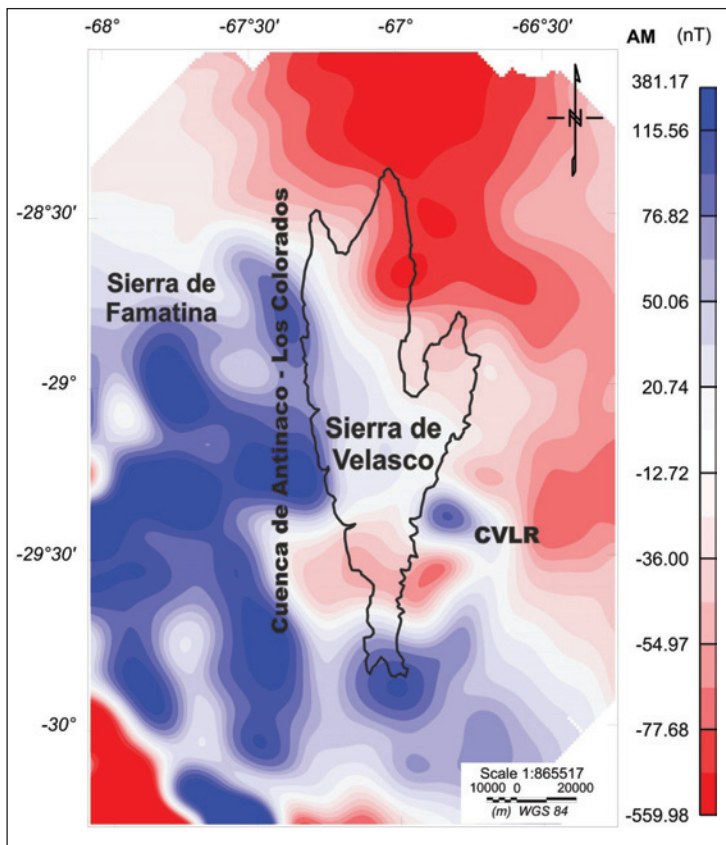


Figura 3: mapa de Anomalías Magnéticas. (CVLR: Cuenca del Valle de la Rioja).

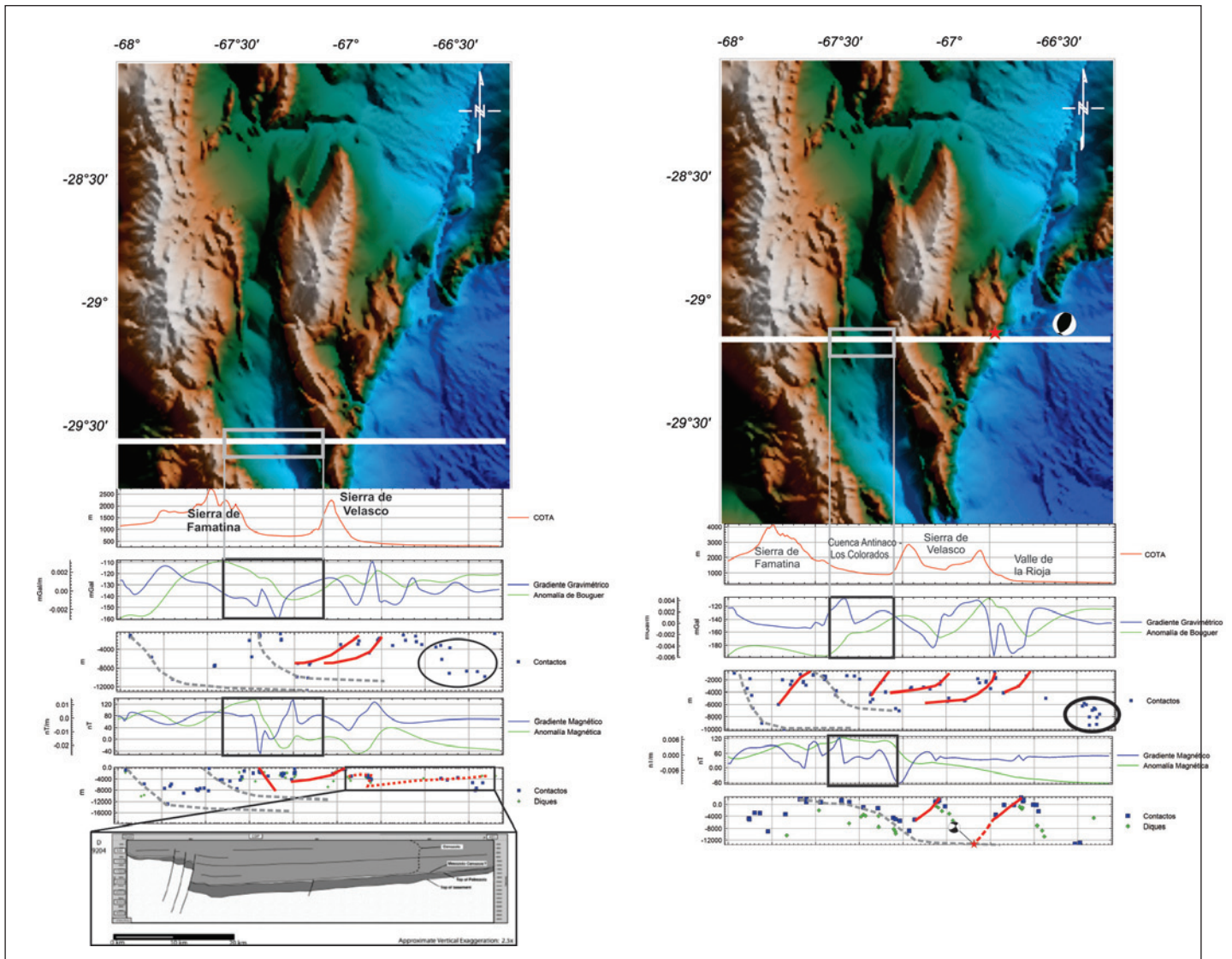


Figura 4: a. (Izquierda): soluciones Deconvolución de Werner – Perfil Transversal P1. A la Izquierda la aplicación en el campo gravimétrico; y a la derecha para el caso magnético. En blanco se indica la ubicación del perfil utilizado para calcular soluciones con el Método de Werner. Se puede identificar la morfología de la cuenca que coincide con el tratamiento sísmico realizado sobre la línea sísmica de YPF. Figura 4 b. (Derecha): soluciones Deconvolución de Werner – Perfil Transversal P2. A la Izquierda la aplicación en el campo gravimétrico; y a la derecha para los datos magnéticos. En blanco se indica la ubicación del perfil utilizado para calcular soluciones con el Método de Werner. Se presenta el diagrama de mecanismo focal asociado al sismo del 28/05/2002, localizado en el perfil estudiado (Alvarado y Ramos, 2011).

un comportamiento disímil entre la sierra de Velasco y el Sistema Famatina. Ver recuadro en negro en la figura 4a.

Gibb y Thomas (1976) propusieron que la localización de una zona de sutura mediante el método gravimétrico se basa en la interpretación edad-efecto entre la yuxtaposición de bloques corticales de diferentes densidades medias y espesores. La discontinuidad gravimétrica entre los bloques indica la faja de sutura. Ejemplos de suturas ó paleosuturas identificadas a partir de anomalías gravimétricas y magnéti-

cas han sido informados por: Marangoni *et al.* (1995), Ramé *et al.* (1995), Ruiz e Introcaso (1999), Gimenez *et al.* (2000), Martínez y Gimenez (2003), Chernicoff y Ramos (2003), Chernicoff y Zappettini (2003), Gimenez *et al.* (2005), Chernicoff y Zappettini (2007), entre muchos otros. Esto podría estar indicando que estamos observando la transición entre los terrenos Famatina y Pampia.

Luego, sobre los resultados de la deconvolución de Werner, visto de Oeste a Este, observamos que existe un fuerte alineamiento

de soluciones (indicadas con trazo rojo en las figuras) con vergencia al Este debajo de la sierra de Famatina, que correspondería al fallamiento inverso que levanta esta Sierra, consistentes con las interpretaciones de Ramos, 1999; Ramos *et al.* 2002, Alvarado y Ramos 2011. Esta discontinuidad se ve tanto en las soluciones gravimétricas como en las magnéticas y se extiende hasta una profundidad no mayor de 12 km. Por otra parte, las soluciones mejor alineadas hacia el E de la sierra de Velasco son las magnéticas. Debajo del valle de la Rioja existe una

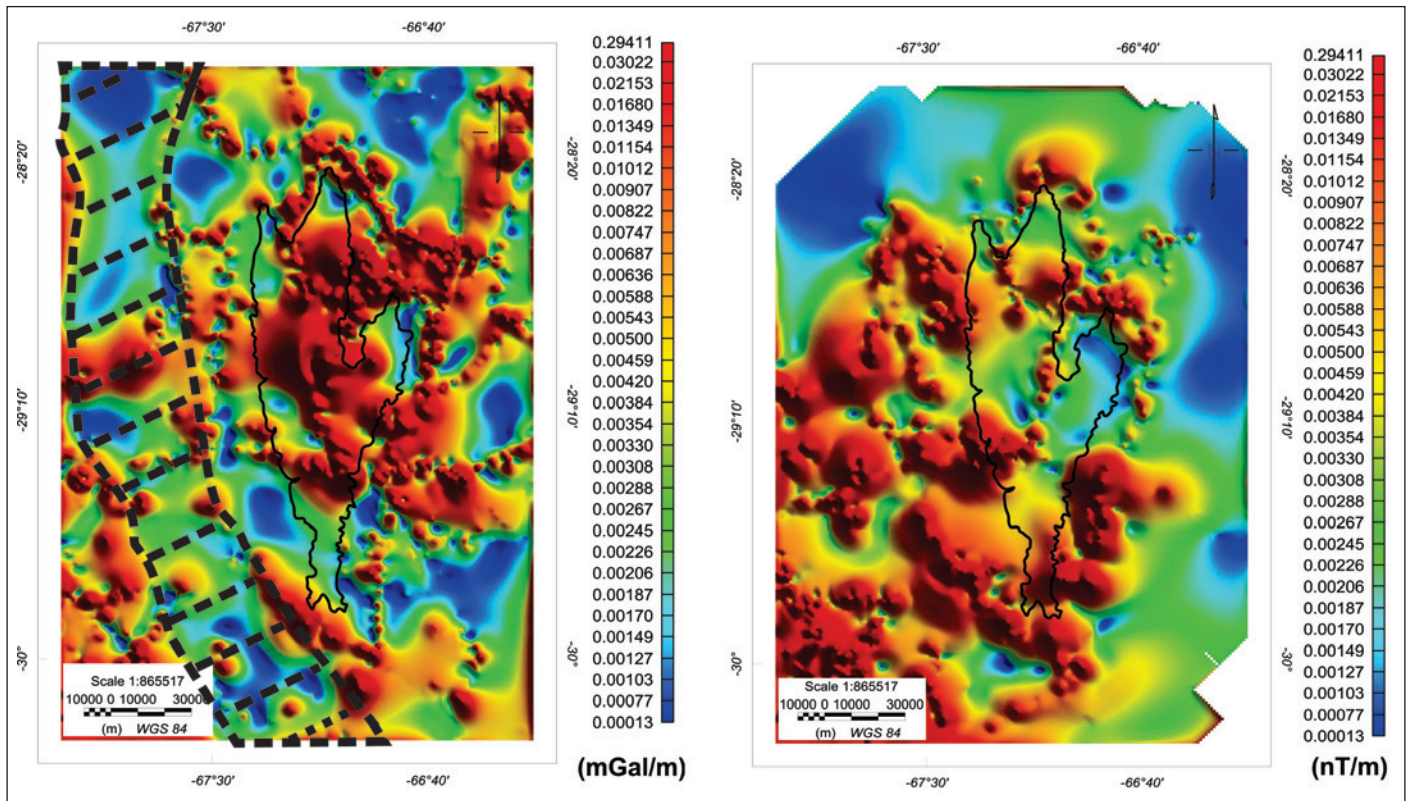


Figura 5: a. (Izquierda): mapa de Señal Analítica para anomalías de Bouguer (SAB). Los trazos en blanco señalan el límite en planta que se puede relacionar con el alóctono llamado Famatina y hacia el oriente el alóctono Pampia. Figura 5 b. (Derecha): mapa de Señal Analítica para anomalías magnéticas (SAT). Debido a las características de los datos magnéticos, no es clara la diferencia entre Famatina y Pampia.

serie de soluciones que interpretamos como discontinuidades en el basamento cristalino de esta cuenca, tal como lo señala la interpretación de la línea sísmica 9204 de Fisher *et al.* (2002) y el modelo gravimétrico de Gimenez *et al.* (2009). Se comparó el resultado obtenido con la línea sísmica 9204 citada inicialmente y se observa un gran ajuste respecto al límite entre sedimentos - basamento.

- Perfil 2: En este perfil, también se observa un comportamiento diferencial tanto en la anomalía de Bouguer, como en la magnética debajo la Sierra de Velasco y el Sistema Famatina, señalado por el elevado gradiente indicado también en el perfil 1.

Sobre los resultados de la deconvolución de Werner, vemos un fuerte alineamiento de soluciones (fallas, marcadas con líneas llenas rojas) que en su mayoría no superan los 8 km de profundidad y pueden definirse tanto en el caso gravimétrico, como en el magnético. En la Figura 4b, con línea de trazos gris, se indican las alineaciones

que responden a las posibles fallas distensivas anteriores (Paleozoico Tardío) al levantamiento de las sierras (Ramos *et al.*, 2002; Dávila *et al.*, 2005). Si unimos este concepto, al general de bloques alóctonos amalgamados en el paleozoico (Rapela *et al.* 2008; Ramos *et al.* 2009), estas líneas grises podrían estar identificando los límites del Sistema Famatiniano.

Respecto a dicha alineación de soluciones encontradas mediante el método de Werner, hemos prolongado el contacto o falla que se correspondería con el sistema de fallas inversas que levantan el flanco oriental de la sierra de Velasco, hacia la intersección con el lineamiento en gris propio del despeque del bloque Famatina; esto se corresponde con la ubicación del mecanismo focal (estrella) del sismo de magnitud 5,8 - 6,0 anteriormente descrito con dos posibles planos de falla.

Por lo tanto, en ambos perfiles (1 y 2) notamos un cambio significativo en la respuesta gravimétrica hacia ambos lados de

la Cuenca de Antinaco - Los Colorados. Hemos señalado con un recuadro la porción correspondiente al alto gradiente encontrado en la señal gravimétrica (ver línea verde). Estos elevados gradientes, son condición necesaria para la determinación de suturas (ya propuesto desde 1975 por Thomas y Thanner). Así advertimos en el Perfil 1 un descenso abrupto entre -110 mGal hasta -140 mGal, mientras que en el Perfil 2 hay un ascenso abrupto entre -200 mGal a -130 mGal en el lugar de emplazamiento de la Cuenca de Antinaco - Los colorados y separa a la Sierra Pampeana Occidental (en este caso Sierra de Velasco) del Sistema Famatina.

Por último el método de Señal Analítica arrojó interesantes resultados para ambos campos potenciales (Figs. 5a y b). Hacia el oeste de la sierra de Velasco, observamos en ambas soluciones de Señal Analítica, un fuerte alineamiento de soluciones debajo de lo que se conoce como la cuenca de Antinaco - Los Colorados coincidente con los

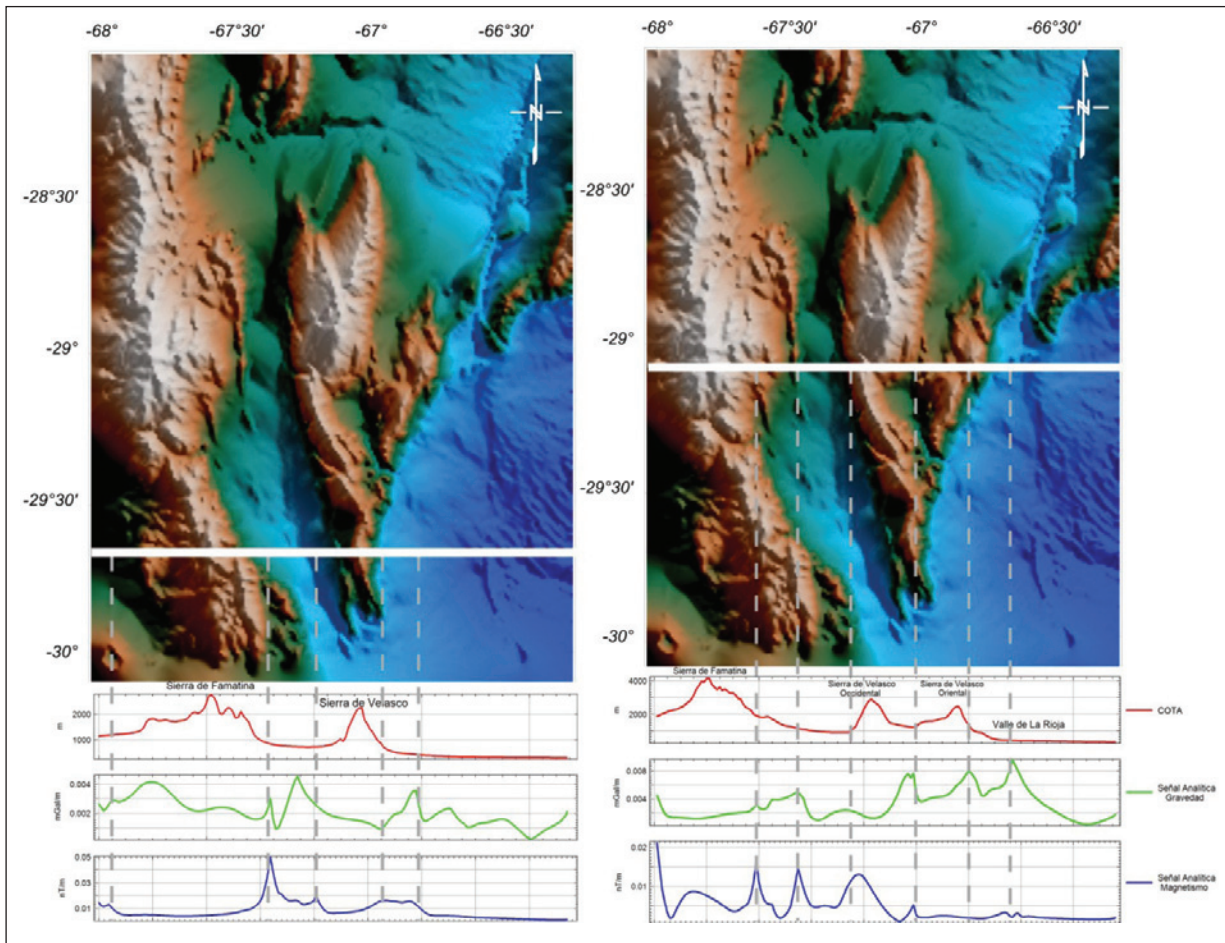


Figura 6: a) izquierda: respuesta de la Señal Analítica en el perfil transversal P1 (arriba en rojo, altitud en m; en el centro, en verde SAG para este perfil; abajo y en azul SAT para el mismo perfil); b) derecha: respuesta de la Señal Analítica en el perfil transversal P2 (idem descripción que el perfil P1).

resultados descritos de la aplicación de los demás métodos

Por último, en los perfiles presentados en las figuras 6a y 6b, se correlacionan (con líneas discontinuas) los máximos de la señal analítica con las discontinuidades geológicas. Se observa en ambos casos varios máximos en ambas señales, que corresponderían a la

sutura entre los bloques Famatina y Cuyania ratificando así, los resultados obtenidos mediante la Deconvolución de Werner. En términos generales existen mayor cantidad de máximos en la señal analítica gravimétrica, y nos permite reconocer más rasgos estructurales no aflorantes (basamento fracturado) bajo la cuenca del valle de la Rioja.

Con las evidencias anteriores, proponemos un esquema estructural (Fig. 7) que sintetiza los resultados encontrados. En esta representación se esbozan las principales fallas que levantan los bloques de basamento para formar las sierras de Famatina y Velasco en el perfil 2, las posibles zonas de sutura a ambos lados del Famatina y se dibujan las

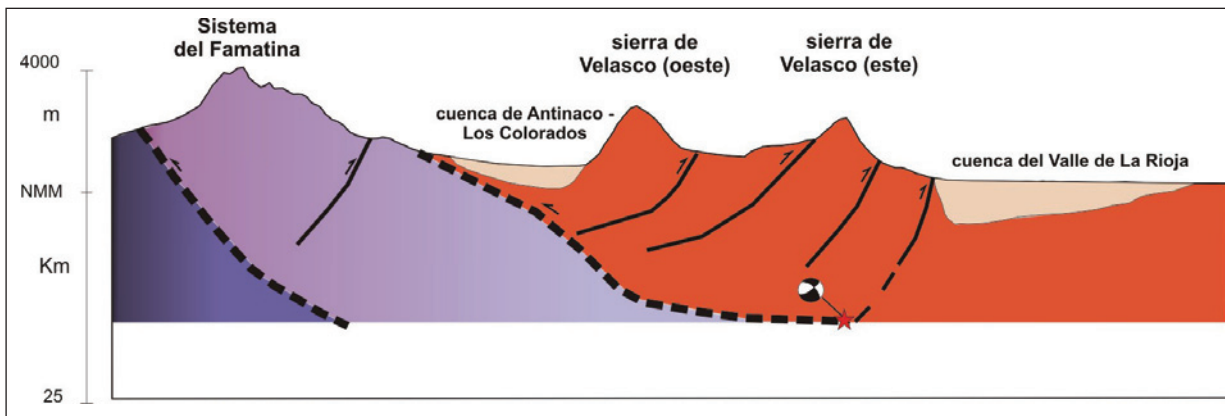


Figura 7: esquema estructural con diferentes basamentos en las sierras de Velasco y Sistema de Famatina en el perfil este-oeste (consistente con Perfil 2).

cuencas intermontanas reconocidas. Nótese también la razonable localización del sismo de 28 de mayo de 2002 a 8 km de profundidad, ubicándose en este esquema en el cruce de una antigua zona de distensión y una nueva falla compresiva, desde aquí es que ambos planos de solución del mecanismo focal sean posibles.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos PIP 6044 (CONICET), N°21 E901 (CICITCA), PICT-2007-01903 (Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica) y Techint 2011.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Alvarado, P. y Ramos, V., 2011. Earthquake deformation in the northwestern Sierras Pampeanas of Argentina based on seismic waveform modeling. *Journal of Geodynamics*, 51 (2011) 205-218.
- Astini, R., Ramos, V., Benedetto, J., Vaccari N. y Cañas, F., 1996. La Precordillera: Un terreno Exótico a Gondwana. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. *Actas V*. pp: 293-324.
- Briggs, I. C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics* 39: 39-48.
- Camino, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. *Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba*. V, 1: 225-291.
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting*. McGraw Hill, 3rd edition, pp 630.
- Fisher, N. D., Jordan, T. E. y Brown L., 2002. The structural and stratigraphic evolution of the La Rioja basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15:141-156.
- Gimenez, M.; Martínez, P.; Jordan, T.; Ruiz, F. y Lince Klinger, F., 2009. Gravity characterization of the La Rioja Valley Basin, Argentina. *Geophysics*, 74. N° 3.P: B83:B94.
- Gonzalez Bonorino, F., 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49: 81110.
- Hartman, L., Teskey, D., Jeffreys, L. y Friedberg, L., 1971. A system for rapid digital aeromagnetic interpretation. *Geophysics*, 36: 891-918.
- Lazarte, J. E., 1987. Contribución a la petrología de los granitoides de la sierra de Papachacra, Catamarca, Rep. Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino 4: 69-72.
- Lazarte, J. E., 1991. Estudio petrológico y geoquímico de los granitoides de las sierras de Papachacra y Culampajá. *Relaciones metalogenéticas*. Tesis Doctoral, UNT, 270 págs.
- Lazarte, J. E., 1992. La Formación Chango Real (NO de Sierras Pampeanas, República Argentina), ejemplo del magmatismo paleozoico (Cámbrico?). *Diferencias geoquímicas con batolitos ordovícicos*. *Estudios Geológicos*, 48: 257-267.
- Linares, E. y González, R. R., 1990. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina 1957-1987. *Publicación Especial de la Asociación Geológica Argentina, serie B (Didáctica y Complementaria) 19*: 1-628.
- López, J. P., Grosse, P. y Toselli, A. J., 2007. Faja de Deformación La Horqueta, Sierra de Velasco, Sierras Pampeanas, NO de Argentina: petrografía, geoquímica, estructuras y significado tectónico. *Estudios Geológicos*, 63: 5-18.
- Martínez, M. P., Gimenez, M. E. e Introcaso, A. y Ruiz, F., Hünicken, M. e Introcaso, B., 2000. Carta Gravimétrica de la Provincia de La Rioja (1999). *Anomalías Simples de Bouguer*. Publicación del Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. Séptimo Volponi. UNSJ. FCEF.N.
- Martínez, M. P., Gimenez, M. E., Introcaso A., 2001. Carta Gravimétrica de la Sierra de Velasco (2000). Publicación del Instituto Geofísico Sismológico Volponi. UNSJ. FCEF.N.
- Martínez, M. P. y Gimenez, M. E., 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: 176-186.
- Martínez, M. P. y Gimenez, M. E. 2005. "A Preliminary Crustal Geophysic model at 29°18' South latitude based on the observed Bouguer anomaly". *ISAG (6th International Symposium on Andean Geodynamics, Universitat de Barcelona, Actas*, pp: 485-489, Barcelona. España.
- Martínez, M. P., Casas, A. y Gimenez, M. E., 2010. Gravity Model of a Transect in the Southern Region of the Central Andes. 72 EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010. Barcelona, Spain.
- Morelli, C., Gantar C., Honkasalon T., McConnell K., Tanner J.G., Szabo B., Uotila U. & Whalen, C.T., 1974. The international Gravity Standardization Net 1971 (IGSN71), IUGG-IAG Publ. Spec 4, Int. Union of Geod. and Geophysics., Paris 194 pp.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-sections: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37: 507-517.
- Nabighian, M.N., 1974. Additional comments on the analytic signal of the two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: *Geophysics*, 39: 85-92.
- Pankhurst, R. J., Rapela C. W., Casquet C., Baldo E., Saavedra J., Galindo C. y Fanning C. M., 1998. The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. In: Pankhurst R. J., Rapela C. W. (eds.), *The Proto-Andean Margin of Gondwana Geological Society Special Publication*, 142:179-217.
- Quenardelle, S. M. y Ramos, V. A., 1999. Ordovician western Sierras Pampeanas magmatic belt: Record of Precordillera accretion in Argentina. In: Ramos, V. A. y Keppie, J. D. (eds.), *Laurentia- Gondwana connections before Pangea*. Geological Society of America, Special Paper 336: 63-86.
- Rassmuss, J., 1916. Rasgos geológicos generales de las Sierras Pampeanas. *Dir. Gral. de Minas Geol. Hidrol. Bs.As. Bol.* 13 B.
- Ramos, V., 1988. The tectonics of the Central Andes; 30° to 33°S Latitude. *Geological Society of America, Special Paper* (218).
- Ramos, V., 1989. The birth of Southern South America. *American Scientist*, 77: 444-450.
- Ramos, V., 1999. Rasgos Estructurales del Territorio Argentino. *Evolución tectónica de la Argentina*. Editor Roberto Camino. *Anales N° 29 (24)*: 715-759.
- Ramos, V., Cristallini, E.O. y Pérez, D.J., 2002. The Pampean Flat-Slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 59-78.

- Rapela, C. W. y Dahlquist, J. A., 1997. Los granitoides Ordovícicos de la Sierra de Chepes, Batolito de Los Llanos-Ulapes, Sierras Pampeanas. 14º Reunión de Geología do Oeste Peninsular, Vila Real, Portugal, Comunicaciones: 31-36.
- Rapela, C. W., Pankhurst R. J., Casquet C., Baldo E., Saavedra J., Galindo C. y Fanning C. M. 1998. The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. In: Pankhurst R. J., Rapela C. W. (eds.), *The Proto-Andean Margin of Gondwana Geological Society Special Publication*, 142:179-217
- Rapela, C. W., Coira, B., Toselli A. y Llambías E. J., 1999. El Basamento Precámbrico - Paleozoico inferior de las Sierras Pampeanas, Famatina, Cordillera oriental y Puna. Sistema Famatiniano de las Sierras Pampeanas y Magmatismo eopaleozoico de las Sierras Pampeanas, de la Cordillera Oriental y Puna. *Geología Argentina. Anales* N° 29. (ed. R. Caminos). Bs As. 1999.
- Roest, W., Verhoef, J. y Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3D analytic signal. *Geophysics*, 57: 116-125.
- Rossello, E., Limarino, C., Ortiz, A. y Hernández, N., 2005. Cuencas de los Bolsones de San Juan y La Rioja. En Chebli, G.A, Cortiñas, J.S., Spalletti, L.A, Legarreta, L. y Vallejos, E. L. (eds.): *Frontera Exploratoria, VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, IAPG, 7: 147-173, Mar del Plata.
- Sánchez, M. A., Spagnotto, S., Nacif, S., Martínez, M. P., Gimenez, M., y Ruiz, F., en prensa. Primer aporte gravi-magnetométrico en la sierra pampeana de Velasco. *Determinación de grandes rasgos estructurales. Latinmag Letters*.
- Sánchez, M. A., Weidmann, M. C., Ariza, J. P., Martínez, M. P. y Ruiz, F., 2011. Análisis de campo magnético mediante métodos de filtrado de anomalías en la Sierra Pampeana de Velasco. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue (2011), A09, 1-7. *Proceedings Tandil, Argentina*.
- Sánchez, M. A., Ariza, J. P., Weidmann, M. C., Fanton, G., Gimenez, M. E., Ruiz, F. y Martínez, M. P., 2011. Aplicación del método espectral a la carta magnética de la Sierra de Velasco. Un método para determinación de profundidades. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue (2011), A11, 1-5. *Proceedings Tandil, Argentina*.
- Salem, A., 2005. Interpretation of magnetic data using analytic signal derivatives. *Geophysical Prospecting*. 53: 75-82.
- Sims, J.P., Ireland, T.R., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P.E., Skirrow, R.G., Stuart-Smith P.G. y Miró, R., 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Palaeozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. In R.J. Pankhurst and C.W. Rapela (eds.) *The Proto-Andean margin of Gondwana. Geological Society, London, Special Publication* 142: 259-281.
- Thomas, M. D. y Thanner, J. G., 1975. Crustal structure in the eastern Greenville Province. *Nature*, 256: 392-394.
- Werner, S., 1953. Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies: *Sveriges Geologiska Undersök*, Ser. C.C. *Arsbok* 43, N: 06.

Recibido: 23 de marzo, 2012

Aceptado: 10 de diciembre, 2012