

**ESTUDIO DE ACORTAMIENTOS EN EL ÁREA DE LAS SIERRAS  
PAMPEANAS DE SAN JUAN. ARGENTINA.**

**Patricia Martínez<sup>1,2</sup>; Mario Gimenez<sup>1</sup>; Antonio Introcaso<sup>3</sup>**

1-Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica.  
(CRILAR). Entre Ríos y Mendoza. 5301 Anillaco. La Rioja. Argentina.

2-Instituto Sismológico Ing. F.S. Volponi. F.C.E.F.N. -Univ. Nac. de San Juan.  
Av. Ignacio de La Roza y Maglioli. Rivadavia. 5400. San Juan. Argentina.

3-Instituto de Física de Rosario (IFIR), Fac. de Cs. Ex., Ingeniería y Agrimensura. Univ.  
Nac. de Rosario, Av. Pellegrini 250, 2000, Rosario. Argentina.

**RESUMEN**

En este trabajo se han calculado los excesos de masas y los acortamientos producidos en el área de las Sierras Pampeanas sanjuaninas. El análisis se realizó sobre cuatro perfiles E-W que secciona el área a los 30° - 30°30' - 31° y 31°30' de latitud Sur.

Los contornos del Moho se obtuvieron a través de la inversión gravimétrica de la anomalía de Bouguer corregida por el efecto positivo que produce la placa de Nazca en subducción aplastada en estas latitudes. Los acortamientos se han calculado según:  $Sh = (ST + SR) / Tn$ ; siendo Sh: acortamiento cortical, Tn: corteza normal asumida de 33 km, ST: área topográfica, SR: área de la raíz cortical.

Se han obtenido acortamientos coherentes con anteriores resultados sísmicos. Los acortamientos calculados entre los 69° y 67° de longitud W, y 31° y 31° 30' son del orden de 60-80 km. Mientras que los acortamientos calculados sólo para la Sierra de Valle Fértil varían de 16 a 28 km para las mismas latitudes.

**ABSTRACT**

Shortenings and mass excesses on Sierras Pampeanas San Juan zone, have been calculated. Four E-W profiles on: 30°, 30° 30', 31° and 31° 30' South latitude were analyzed.

Using Bouguer gravity inversion, involving subhorizontal Nazca Plate effects both Moho contours and shortenings were calculated ( $Sh = (ST + SR) / Tn$ ), with Sh: crustal shortening, Tn: normal crustal thickness, ST: topographic area, SR: crustal root.

The shortenings are consistent with seismic results. Between 69° and 67°W and on 31° and 30° 30' South profiles, Sh is 60-80 km, while on Sierra de Valle Fértil isolated Sh is 16-28 km on the same latitudes.

**1. EXCESOS DE ESPESORES CORTICALES EN EL SEGMENTO DE LAS SIERRAS PAMPEANAS DE SAN JUAN**

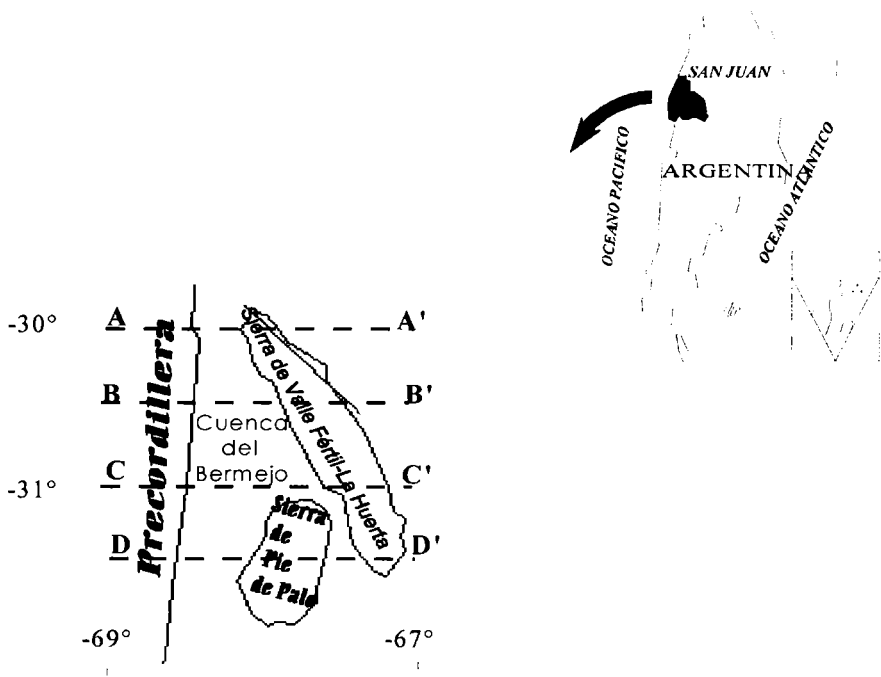
Está comprobada la existencia de la raíz andina por debajo de la Cordillera de los Andes (Introcaso-Pacino, 1988; Isacks, 1988, etc.). Esta gran potencia cortical sumada a la gran elevación de los Andes ha dado lugar a que se propongan distintos mecanismos relacionados con el origen de la Cordillera (Konoet *al.*, 1989; Introcaso, 1993; Martínez *et*

*Estudio de acortamientos en el área de las sierras pampeanas...*

al., 1994-1995): i) mecanismos de acortamiento (producto de la compresión), ii) adición magmática, iii) dilatación térmica, iv) combinaciones entre los anteriores.

Del mismo modo se asumió una corteza engrosada hacia el este de la Cordillera Andina y se propone la determinación de "excesos de espesores corticales respecto de niveles normales" (Martínez *et al.*, 1994).

En lo que sigue cuantificamos los excesos de masas que se produjeron en la corteza terrestre para el sector de las Sierras Pampeanas de San Juan que involucran los cuatro perfiles en estudio (figura 1).



**Figura 1. Ubicación geográfica de los perfiles, y unidades geográficas atravesadas**

El exceso de área cortical (E) respecto de los niveles 'normales' en un sistema 2D, será:

$$E = ST + SR \tag{1}$$

Siendo ST: área topográfica (km<sup>2</sup>); SR: área de la raíz (km<sup>2</sup>); y E=Sh x Tn (véase ecuación 2).

Contando con la topografía digitalizada cada 8 km (base de datos ARGENTOP, gentileza del Instituto de Física de Rosario -FIR-), se encuentra el área topográfica (ST), a través de la suma de las áreas de los paralelepípedos bidimensionales resultantes de cada perfil comprendido entre la Precordillera al oeste y la culminación de la Sierra Pampeana de Chepes, al Este. Se tomó la superficie por encima de los 300 metros de altitud, pues suponemos que es el nivel base no afectado por la deformación (Isacks B., 1988). Ver segunda columna en la Tabla 1.

Mediante el método de Prolongación Ascendente e Inversión (Pacino-Introcaso, 1987) se determinó el perfil del Moho, adoptando densidades de  $2.9 \text{ g/cm}^3$  y  $3.3 \text{ g/cm}^3$  para corteza inferior y manto superior (Introcaso *et al.*, 1992). En la figura 2 se muestran solo los dos perfiles centrales (de los cuatro estudiados), debido a que los resultados son similares.

El área de la raíz cortical se determinó mediante la suma de trapecios de igual base por debajo del espesor normal de corteza,  $T_n = 33 \text{ km}$  (valor tomado como el espesor normal de corteza antes de la deformación por Woollard, 1969; Pacino-Introcaso, 1987; entre otros). Luego en la Tabla 1, columna 4, se han calculado los excesos de masas mediante la ecuación (1).

Podemos notar que los excesos de masas disminuyen de norte a sur, excepto a la altura del paralelo  $31^\circ 30'$  en donde nos encontramos con la Sierra de Pie de Palo que exhibe un engrosamiento cortical respecto de los perfiles anteriores (Martínez, 1997).

## 2. ACORTAMIENTOS

Si asumimos que: a) toda el área estuvo sometida a una intensa compresión (Baldiset *al.*, 1979; Triep y Cardinalli, 1984; Figueroa y Ferraris, 1989; Cominguez y Ramos, 1990; etc.) y, b) preservación del área en una sección bidimensional (ó conservación de masa antes y después de la deformación por compresión); luego, la suma de la elevación del terreno en la sección del área y la raíz cortical, dividida por el espesor de corteza original igualará a la cantidad de acortamiento producido en esa área (Introcaso *et al.*, 1992):

$$Sh = (ST + SR) / T_n \quad (2)$$

Siendo Sh: acortamiento cortical (km);  $T_n$ : corteza normal asumida de 33 km.

De esta manera se han calculado los acortamientos para: (a) la porción Pampeana en estudio ( $Sh_P$ ), que se extiende desde el borde este de Precordillera, atraviesa las Sierras de Pie de Palo (perfil  $31^\circ 30'$ )-Valle Fértil hasta concluir con la Sierra de Chepes, Tabla 1; y (b) para la Sierra de Valle Fértil ( $Sh_V$ ), Tabla 2, en sus secciones más significativas: paralelos  $30^\circ 30'$  y los  $31^\circ S$ . Dado que las raíces corticales calculadas por inversión son las mismas dentro de un 3% a 5% tal como lo comprobamos modelizando, tanto usando  $T_n = 33 \text{ km}$  como  $T_n = 40 \text{ km}$ , hemos calculado Sh también para este último valor (última columna de Tabla 1). Las discrepancias entre los dos Sh muestran la sensibilidad que presenta la elección de  $T_n$ .

*Estudio de acortamientos en el área de las sierras pampeanas...*

**TABLA 1. Primeros acortamientos calculados (ShP) para el sector pampeano comprendido entre 30° S y 31°30'S y entre 69° y 67° de longitud W.**

Perfil	Área Topográfica Pampeana (km <sup>2</sup> )	Área raíz (km <sup>2</sup> )	Excesos de Masa (km <sup>2</sup> )	ShP (km) Tn=30 km	ShP (km) Tn=40 km
30°S	134	905	1039	31.5	26
30°30'S	143	875	1018	31	25.5
31°S	133	725	858	26	21.5
31°30'S	109	1135	1244	38	31.1

**TABLA 2. Primeros acortamientos calculados (ShV) según la ecuación (2) para dos perfiles que atraviesan la Sierra de Valle Fértil.**

Perfil	Área Topográfica Sa. Valle Fértil (km <sup>2</sup> )	Área raíz (km <sup>2</sup> )	ShV (km)
30°30'S	72	208	8.5
31°S	55	138	6

Sin embargo, la influencia gravimétrica de la placa de Nazca, que en estas latitudes subduce de manera subhorizontal sin una importante cuña astenosférica asociada, ha sido determinada sobre dos secciones 30°30'S y 31°S, ver figura 2. La anomalía gravimétrica positiva de la placa de Nazca se incorpora como una corrección adicional a la anomalía de Bouguer, permitiendo luego un engrosamiento cortical, para mantener inalterable a la anomalía de Bouguer observada.

Con esta variación del espesor cortical, manteniendo la misma anomalía de Bouguer (figuras 2) también varían los cálculos de acortamiento como vemos en las tablas 3 y 4.

Por último se realizó una estimación de los errores:

- en la evaluación de las áreas topográficas encontramos  $\pm 7\%$  de error porcentual;
- para la área de la raíz cortical estimamos  $\pm 5\%$ ;
- para el espesor de Corteza normal estimamos un  $\pm 10\%$ .

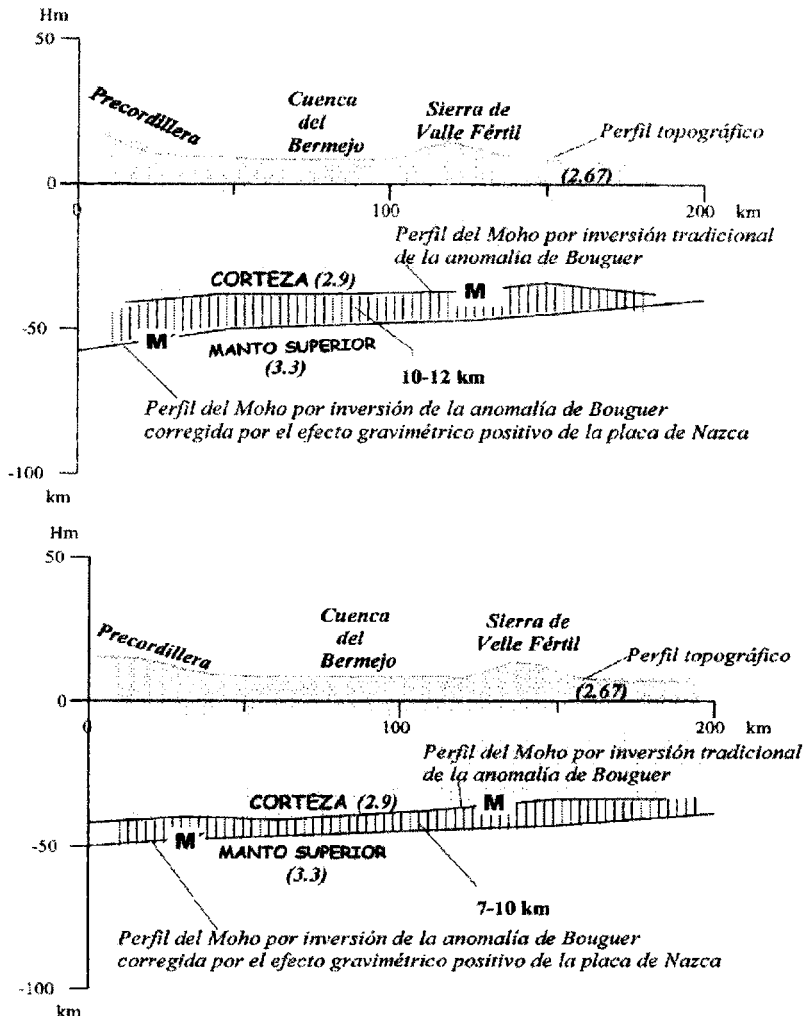


Figura 2. Modelos simples de corteza para perfiles que atraviesan la Precordillera, Cuenca del Bermejo y la Sierra de Valle Fértil. Arriba: Sección a los 30°30'Sur, Abajo Sección a los 31°Sur. En la parte superior de ambos gráficos se han superpuesto los perfiles topográficos en otra escala (exagerada en 10). M: Perfil del Moho obtenido por inversión de la anomalía de Bouguer. M': perfil del Moho obtenido por inversión de la anomalía de Bouguer corregida por el efecto positivo de la placa de Nazca. Los perfiles de anomalía de Bouguer han sido tomados del trabajo de Martínez (1997). La anomalía de Bouguer fue prolongada a 40 km de altura e invertida mediante el método de inversión poligonal desarrollado por Talwani *et al.* (1959). Se puede observar que se produce un incremento de aproximadamente 10 km entre M y M'. Los valores entre paréntesis indican las densidades consideradas en la inversión gravimétrica y están dadas en gramos sobre centímetros cúbicos.

*Estudio de acortamientos en el área de las sierras pampeanas...*

**TABLA 3. Acortamientos Corticales (ShP) calculados a partir de una corteza engrosada incorporando el efecto positivo de la placa de Nazca en la anomalía de Bouguer antes de la inversión gravimétrica.**

Perfil	Área Topográfica Pampeana (km <sup>2</sup> )	Área raíz (km <sup>2</sup> )	Excesos de masa (km <sup>2</sup> )	ShP (km)
30°30'S	143	2475	2617	79
31°S	133	1815	1948	59

**TABLA 4. Igual a la Tabla 3, en este caso los cálculos se limitan a la Sierra de Valle Fértil.**

Perfil	Área Topográfica Sa. de Valle Fértil (km <sup>2</sup> )	Área raíz (km <sup>2</sup> )	ShV (km)
30°30'S	72	855	28
31°S	55	473	16

### 3. DISCUSIÓN

Regnier *et al.* (1994) utilizando técnicas de balance de áreas, estiman el acortamiento de la provincia de las Sierras Pampeanas para los últimos 5 a 10 Ma. Suponiendo un espesor original de corteza de 40 km, encuentran que toda la provincia pampeana (481 km de ancho actual, Jordan y Allmendinger, 1986) tuvo un ancho de 625 km ó 553 km, ver figuras 3 y 4, siendo el primero producto de un acortamiento cortical uniforme (144 km máximo) y el segundo un engrosamiento lineal progresivo (72 km).

Calculamos ahora los "Bordes Libres" (para más detalles ver Introcaso *et al.*, 1993), considerando un acortamiento cortical uniforme:

$$BL = T_n (1 - \sigma_c / \sigma_m) \quad (3)$$

Siendo BL: borde libre; T<sub>n</sub>: espesor normal de corteza que asumimos de 40 km (Regnier *et al.*, 1994);  $\sigma_c$ : densidad de corteza (2.9 g/cm<sup>3</sup>);  $\sigma_m$ : densidad del manto (3.3 g/cm<sup>3</sup>).

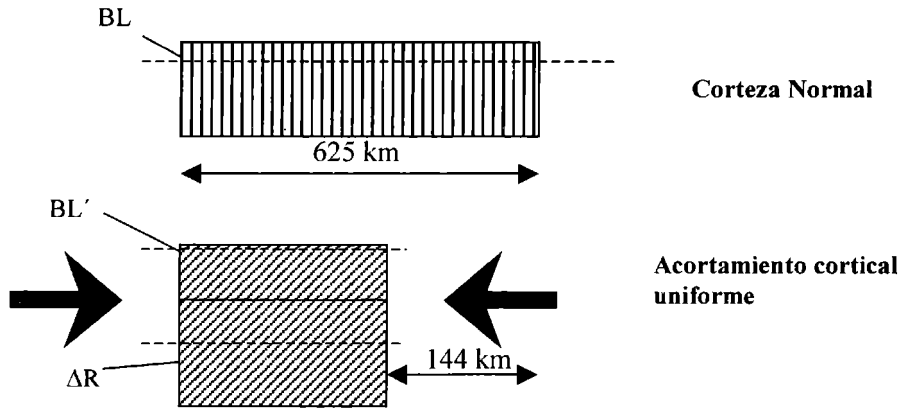


Figura 3. Esquema ilustrativo en donde se representa el Acortamiento cortical uniforme según Regnier *et al.* (1994).

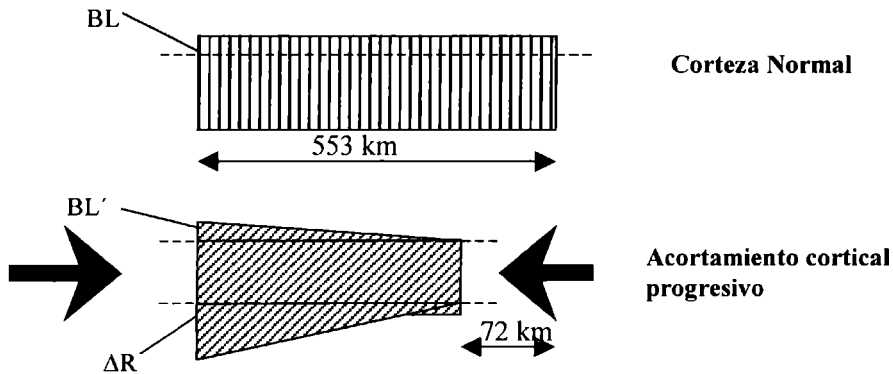


Figura 4. Esquema ilustrativo donde se representa el Acortamiento cortical progresivo, según la propuesta de Regnier *et al.* (1994).

Para un bloque de 625 km (de largo) por 40 km (de espesor), el  $BL = 4.84$  km. Luego de la compresión (144 km de acortamiento, ver figura 3), el bloque tiene dimensiones de 481 km por 52 km y el nuevo borde libre ( $BL'$ ) es de 6.3 km. La diferencia entre bordes libres es la altura sobre el nivel del mar, o sea:  $BL' - BL = 1.45$  km; una raíz que compense hidrostáticamente esta elevación será:

$$\Delta R = [\sigma_t / (\sigma_m - \sigma_c)] \times h \quad (4)$$

### *Estudio de acortamientos en el área de las sierras pampeanas...*

donde:  $\Delta R$ : raíz por debajo del espesor cortical normal;  $\alpha$ : densidad de la masa topográfica ( $2.9 \text{ g/cm}^3$ );  $\alpha_m$ : densidad del manto superior ( $3.3 \text{ g/cm}^3$ );  $\sigma_c$ : densidad media de corteza por debajo del n.m.m. ( $2.9 \text{ g/cm}^3$ ); y  $h$ : altura promedio respecto del nivel medio del mar (diferencia entre los bordes libres).

$$\Delta R = 7.25 \times 1.45 = 10.55 \text{ km.}$$

Los resultados se repiten cuando consideramos un acortamiento lineal progresivo, figura 4.

Si consideramos un espesor normal de corteza de 33 km:  $BL = 4 \text{ km}$ , el acortamiento cortical uniforme es de 277 km (y 138.5 km el acortamiento lineal progresivo),  $BL' = 6.3 \text{ km}$ ,  $BL' - BL = 2.3 \text{ km}$ , y  $\Delta R = 16.7 \text{ km}$ . Con esto resulta que el Moho en su borde oeste pampeano ronda los 50 km, con altitudes sobre el nivel medio del mar de  $\sim 2 \text{ km}$ ; esto se corresponde con nuestros resultados (ver figura 2).

Recalculamos los acortamientos según la propuesta de Regnier *et al.* (1994) con un espesor de corteza normal de 33 km (usada en nuestros cálculos). Considerando un engrosamiento lineal progresivo, y un ancho de 204 km (o sea desde la Precordillera al oeste, y las sierras de Valle Fértil y Chepes al este y excluyendo la sierra de Córdoba) obtenemos un acortamiento de 60 km aproximadamente; este valor está en el rango de los determinados en Tabla 3 (79-59 km).

## 4. CONCLUSIONES

Dado que los resultados sísmicos señalan un espesor cortical con 10 km en exceso respecto del modelo gravimétrico bruto (sin apoyo sísmico), la influencia positiva de la placa de Nazca, en subducción aplastada, permite aumentar el espesor cortical en 10 km consistentemente con el Moho obtenido desde sismología.

Los Acortamientos calculados considerando conservación de masas para la porción de Sierras Pampeanas, desde Precordillera (sin incluirla) al oeste, atravesando las Sierras de Valle Fértil-La Huerta y Chepes (sin incluir Sierras de Córdoba) se encuentran en el orden de los 60-80 km, para los perfiles ubicados a los  $31^\circ$  y  $30^\circ 30'S$ , respectivamente. Mientras que los Acortamientos calculados para la Sierra de Valle Fértil varían de 16 a 28 km para las mismas latitudes.

**Agradecimientos:** Al CONICET y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por la financiación parcial de esta investigación mediante los proyectos PICT N°0159 y N°0174 respectivamente.

## REFERENCIAS

- Baldis, B.; Uliarte, E. y Vaca, A., 1979. Análisis estructural de la comarca sísmica de San Juan. RAGA, Revista, vol. 34, N°4, 294-311.
- Cominguez, A.H. y Ramos, V.A., 1990. Sísmica de reflexión profunda entre Precordillera y Sierras Pampeanas. XI Congreso Geológico Argentino. San Juan. vol.2, 311-314.



- Figuroa, D.E. y Ferraris, O.R., 1989. Estructura del Margen Oriental de la Precordillera Mendocina-Sanjuanina. I Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos. vol. 1, 515-529.
- Introcaso, A. y Pacino, M.C., 1988. Modelo gravimétrico de corteza y manto superior bajo el segmento argentino-chileno en la Latitud 32° Sur. V Congreso Geológico Chileno. vol. 2, 63-76.
- Introcaso, A.; Pacino, M.C. y Fraga, H., 1992. Gravity, isostasy and Andean crustal shortening between latitudes 30° S y 35° S. Tectonophysics, vol. 205, 31-48.
- Introcaso, A., 1993. El Levantamiento de Los Andes Centrales involucrando Manto Superior anómalo. 3° Congreso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. Rio de Janeiro. vol. 2, 1043-1047.
- Isacks, B., 1988. Uplift of de central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline. J. Geophys. Res. vol. 93, B4, 3211-3231.
- Jordan, T.E. y Allmendinger, R.W., 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: A modern analogue of rocky mountain foreland deformation. American Journal of Science, vol. 286, 737-764.
- Kono, M.; Fukao, Y. y Yamamoto, A., 1989. Mountain building in the Central Andes. J. Geophys. Res., vol. 94, B4, 3891-1905.
- Martínez, M.P.; Gimenez, M.E.; Introcaso, A. y Robles, J.A., 1994. Exceso de Espesores Corticales y Acortamientos Andinos en tres secciones Sudamericanas ubicadas en 36°, 37° y 39° de latitud Sur. 7° Congreso Geológico Chileno. vol. 1, 101-105.
- Martínez, M.P.; Gimenez, M.E. y Robles, J.A., 1995. Combinación de Acortamiento Cortical y Adición Magmática para la génesis del edificio andino a través de datos gravimétricos. Revista Brasileira de Geofísica, vol. 13, N°3, 221-228.
- Martínez, M.P., 1997. Estudio del levantamiento de la Sierra de Valle Fértil. (Provincia de San Juan). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Cs. Exactas e Ingeniería. pp 153.
- Pacino, M.C.; Introcaso, A., 1987. Regional anomaly determination using the upwards-continuation method. Boll. Geofis. Teor. Appl., vol. 29, N°114, 113-122.
- Regnier, M.; Chiu, J.M.; Smalley, R.; Isacks, B.L. y Araujo, M., 1994. Crustal Thickness Variation in the Andean Foreland, Argentina, from Converted Waves. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 84, N°4, 1097-1111.
- Talwani, M.; Worzel, J.L. and Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture zone. Journal of Geophysical Research, vol. 64, N°1, 49-58.
- Triep, E. y Cardinali, C.B. De, 1984. Mecanismos de sismos en las Sierras Pampeanas Occidentales. IX Cong. Geol. Arg., vol. 3, 61-80.
- Woollard, G.P., 1969. Regional variations in gravity. The earth's crust and upper mantle. Pembroke J. Hart. (Ed). Geophys. Monogr., A.G.U., vol. 13, 320-341.