

**VARIACIONES DE GRAVEDAD EN EL VALLE DE TULUM, SAN JUAN:
APORTES A LA CARACTERIZACIÓN SISMOTECTÓNICA DE LA REGIÓN.**

Francisco Ruiz¹ - Antonio Introcaso² - Álvaro Gallego G.¹⁻² - Alfredo Laplagne³

⁽¹⁾ Instituto Geofísico Sismológico “Ing. Fernando S. Volponi”, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de San Juan.

Meglioli 1160 (sur)-Rivadavia, (C. P. 5400) San Juan. Argentina. E-mail: fruiz@unsj-cuim.edu.ar, Tel./Fax.: 0264-4945015

⁽²⁾ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario. Instituto de Física de Rosario (CONICET).

Av. Pellegrini 250, (2000) Rosario, Argentina. E-mail: geofisic@fceia.unr.edu.ar.

⁽³⁾ Instituto Nacional del Agua. Av. I. de la Rosa 130 (S), (5400) San Juan. E-mail: alaplagne@unsj.edu.ar.

RESUMEN

Con el objeto de establecer relaciones espacio-temporales de la evolución del campo gravitatorio debidas a actividad sismotectónica, se estableció una red de control geodésico areal (RED G1). La red está compuesta por puntos fijos bien materializados, abarca un área de 2500 km², con la ciudad de San Juan en su centro.

Estos puntos fijos fueron vinculados con mediciones precisas de gravedad en los años 2000 y 2004. Las diferencias gravimétricas 2000-2004 se refirieron a la estación de gravedad del Instituto Geofísico Sismológico (UNSJ). El campo de variaciones relativas de gravedad así obtenido, muestra relaciones consistentes con la actividad sísmica de magnitud mayor que 3 (abundante en este período).

Los rasgos más sobresalientes indican: A) una alineación de máximos con variaciones de hasta +0.088 mGal en el sudoeste de la Sierra de Pie de Palo, +0.045 mGal en el Co. Barboza y de +0.065 en el Co. Valdivia. B) Una zona de máximos (hasta 0.090 mGal) en el centro-oeste de la Sa. Chica de Zonda correlacionada con nidos de sismos de magnitud 3 a 3.9. C) Una marcada quietud en los puntos fijos ubicados al sur de la Sa. Chica de Zonda. D) Ascenso generalizado de todos los puntos ubicados al norte del Río San Juan llegando a 0.080 mGal en la Falla de La Laja (Terremoto del 15-01-1944).

Si atribuimos los cambios de g enteramente a cambios topográficos, las variaciones altimétricas estarían en el orden de los 10 cm.

Palabras claves: variación de gravedad, movilidad cortical, terremoto.

ABSTRACT

A network of areal geodetic control (Red G1) was set up with the purpose of establishing space-time relations in the evolution of the gravity field produced by seismo-tectonic activity. The network is composite for points well materialized in the field, and extends over an about 2500 km² area centered in the San Juan city.

These fixed points were linked with precise gravity measurements carried out during years 2000 and 2004. The gravity changes 2000-2004 are evaluated taking as fix the gravity value in the Instituto Geofísico Sismológico (UNSJ) station. The relative gravity variation field shows a consistent relation with the seismic activity with magnitudes higher than 3 in the area, which was frequent during these years.

The most outstanding results indicate that: A) An alignment of maxima with variations up to +0.088 mGal occurs in the Southwest of the Pie de Palo range, of +0.045 mGal in the Barboza, and of 0.065 mGal in the Valdivia interior mountains. B) A zone with maxima up to +0.090 mGal was determined in the central-west sector of the Sierra Chica de Zonda range, correlated with seismic swarms with magnitudes 3 to 3.9. C) A marked quiescence in the fixed points situated to the South of the Sierra Chica de Zonda range. D) A generalized upward zone in the stations situated north of the San Juan River, up to +0.080 mGal in the La Laja fault, where the epicenter of the 15/01/1944 earthquake was located.

If we assign the gravity variations as caused entirely by topographic changes, the height variations would be in the neighborhood of 10 cm.

Keywords: gravity changes, crustal movement, earthquake.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de San Juan se ubica en la región de mayor actividad sísmica de la Argentina. En los últimos sesenta y dos años sufrió tres terremotos destructivos (1944, 1952, 1977) localizados en un radio no mayor que 70km de la ciudad.

Esta región, ubicada detrás del arco andino, está sujeta a esfuerzos originados en la subducción subhorizontal de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Cahill e Isacks, 1992). Aquí se contraponen la tectónica de piel fina de la Precordillera (pliegues y fallas que interesan la corteza superior) y el levantamiento en bloques del basamento de las Sierras Pampeanas, o tectónica de piel gruesa (Jordan y Allmendinger, 1986). La comarca ha sido y es objeto de muchos estudios geofísicos, geológicos y geodésicos. Estos indican una alta velocidad de convergencia entre las placas 6.3 cm/año (Kendrick et al., 2003), establecen modelos geotectónicos (Baldis et al., 1984; Key et al., 1991; Ramos et al., 2002), hacen análisis geodinámicos, de fuentes sismotectónicas y de deformación cortical (Volponi et al., 1982; Triep, 1984; Smalley et al., 1993; Regnier et al., 1994; Perucca y Paredes, 2002; Alvarado y Beck, 2006).

Se sabe que las mediciones precisas de gravedad empleando gravímetros geodésicos son capaces de detectar variaciones del orden de 0.010 mGal (Lambert y Bower, 1991).

Los gravímetros son sensibles tanto a desplazamientos verticales de la superficie topográfica, como a variaciones de densidad en el interior de la tierra. En este estudio se analizan variaciones del campo gravitatorio debidas a fenómenos tectónicos que deberían reflejarse, en parte, en variaciones topográficas vinculadas con actividad sísmica cortical.

RED DE CONTROL GEODÉSICO

Hemos controlado con gravimetría de precisión los siguientes polígonos de puntos fijos con coordenadas geodésicas precisas, que denominamos Red G1 (Figuras 1 y 2):

-Red Sierra Chica de Zonda (14 puntos fijos), que se suman a 9 puntos fijos de la líneas N24, N25 y N349 del Instituto Geográfico Militar (IGM) que rodean a la sierra (Herrada et al., 2001).

-Red La Laja constituida por 12 puntos fijos, destinada al seguimiento de la movilidad cortical de la falla La Laja, departamento Albardón (Sisterna y Ruiz, 1997).

-Red Dirección General de Catastro de la Provincia de San Juan (usamos 20 puntos fijos).

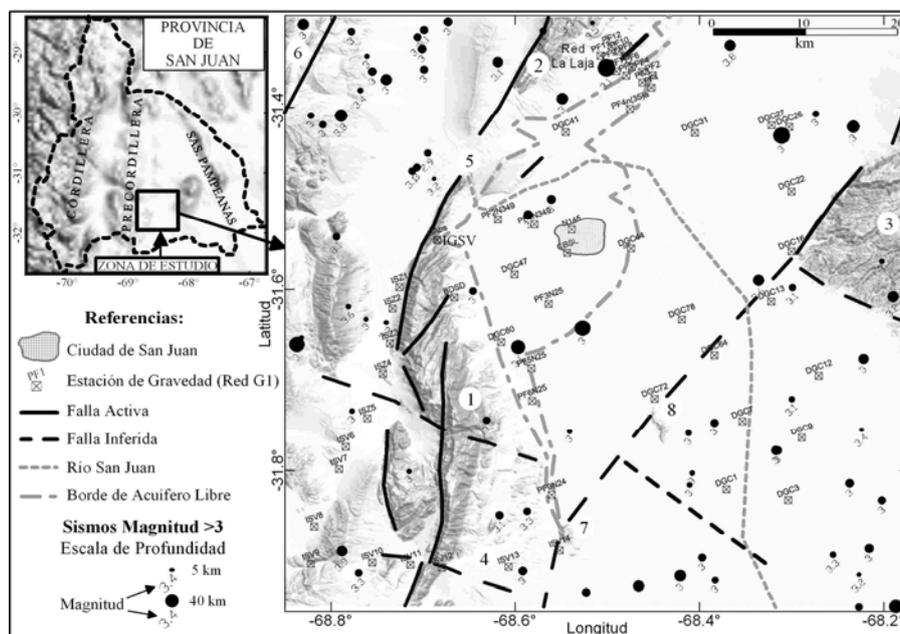


Figura 1. Izquierda: Ubicación de la zona de estudio. Derecha: modelo digital del terreno (SRTM 90m) con: fallas activas, límite de acuífero libre. Cuadrados: puntos fijos de la Red G1. Círculos negros: epicentros de terremotos $M > 3$, período 01-11-2000 a 15-11-2004, ver escala de profanidades en referencias. 1: Sa. Chica de Zonda; 2: Sa. de Villicum; 3: Sa. Pie de Palo; 4: Qda. La Flecha; 5: Dique de Ullum; 6: Precordillera Central; 7: Co. Valdivia; 8: Co. Barboza.

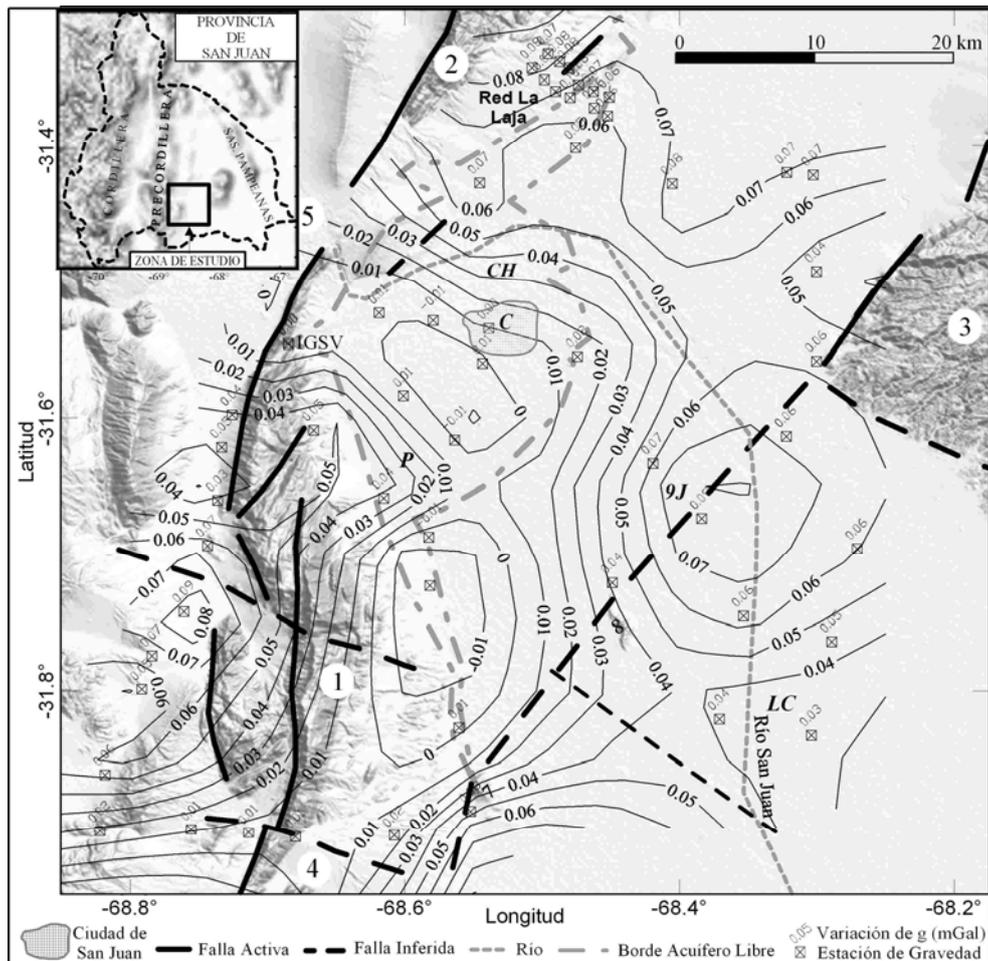


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y modelo digital del terreno (SRTM 90m). Los cuadrados indican los puntos fijos de la Red G1. Las curvas de nivel son el campo de variaciones de la gravedad en el período Noviembre de 2000 a Noviembre de 2004 (equidistancia 0.010 mGal). 1: Sa. Chica de Zonda; 2: Sa. de Villicum; 3: Sa. Pie de Palo; 4: Qda. La Flecha; 5: Dique de Ullum; 7: Co. Valdivia; 8: Co. Barboza; C: Capital; CH: Chimbas; LC: Las Casuarinas; P: Pocito; 9J: 9 de Julio.

Estos puntos fijos están bien materializados y permiten establecer una red gravimétrica de precisión. La Red G1 se midió con un gravímetro geodésico a fines de octubre de 2000 y principios de noviembre de 2004.

Creemos importante monitorear la movilidad cortical producida por la actividad tectónica en la región más poblada de la Provincia de San Juan. El método gravimétrico es una herramienta expeditiva que puede detectar zonas en proceso de deformación vinculado con el fenómeno sísmico. En el futuro pretendemos extender la red a toda la zona de fallamiento activo y controlarla anualmente.

METODOLOGÍA

Los cambios temporales en la gravedad observada pueden expresarse por sus componentes como:

$$g = g_s + g_e + g_g + g_t + g_n(1)$$

g : gravedad observada.

g_s : efectos gravimétricos debidos a fuentes sismogénicas.

g_e : gravedad producto de cambios de elevación:

$$g_e = (0.3086 - 0.0419 \square) \square h(2)$$

g_g : aporte de cambios en las aguas subterráneas:

$$g_g \sim 0.0419 dW(3)$$

g_t : efectos debidos a mareas terrestres, oceánicas y rotación del polo.

g_n : ruido instrumental (deriva, efectos atmosféricos).

σ : densidad en $g.cm^{-3}$.

Δh : Cambios de altitud en m.

dW : depende del nivel de las aguas subterráneas, densidad y permeabilidad del acuífero (mGal).

Los cambios de gravedad de origen tectónico se deben a la suma de g_e y g_s . Donde los g_s dependen de cambios de densidad y volumen ubicados en profundidad, responden a mecanismos complejos resultantes de cambios tectónicos producto del estrés regional. Involucran formación de fallas nuevas, migración de fluidos, transferencia de masas, actividad termal y concentraciones de estrés (Kuo et al., 1999). Las variaciones topográficas (altimétricas) debidas a cambios de volumen y desplazamientos de masas se expresan en g_e .

Mediciones de gravedad

En las mediciones se empleó un gravímetro Scintrex Autograv CG3, con resolución 0.005 mGal. Para asegurar alta precisión ($g_n = \pm 0.010$ mGal) en cada campaña se realizaron: (A) controles de deriva instrumental y (B) controles de calibración. En (A) la pendiente de la deriva instrumental se obtuvo mediante registros de 24 horas en el punto fijo de gravedad absoluta situado en el Instituto Geofísico Sismológico Volponi (IGSV).

Para (B) el gravímetro se controló en la base de calibración del Instituto de Física de Rosario (IFIR) en los años 2000 y 2005, sin encontrarse cambios en la constante instrumental. Además, se construyó una base de calibración en el IGSV. En cada campaña, las mediciones de control se efectuaron en dos puntos fijos, ubicados en la base y cumbre del Mirador (Norte de la Sa. Chica de Zonda). Estas estaciones tienen una diferencia de altitud de 41.52 m y su diferencia de gravedad es de $\Delta g = 12.323 \pm 0.010$ mGal. Ambas están en el mismo afloramiento de roca firme (calizas), lo que asegura la estabilidad de sus diferencias de gravedad con el tiempo.

Las determinaciones de g se efectuaron por el método del rulo con, por lo menos, dos repeticiones por estación. Los cierres no superaron la precisión del gravímetro 0.010 mGal, precisión mantenida en el cierre total de los circuitos cerrados de medición de la red. En cada estación se promediaron 240 lecturas de g en 4 ciclos de medición. Los valores de g medidos fueron corregidos por marea (g_t), variaciones de temperatura, desnivel y vibraciones.

Para minimizar los efectos gravimétricos debidos a variaciones de nivel en las aguas subterráneas (g_g), las lecturas de gravedad en la Red G1 se efectuaron en la misma época (Octubre-Noviembre) en los años 2000 y 2004.

Los valores de g se refirieron al punto de gravedad absoluta del IGSV (979141.649 mGal, medido en el año 1991, Torge et al., 1994). Las diferencias crudas de gravedad (sin corregir por efectos gravimétricos debidos a variaciones de niveles de aguas subterráneas) entre los años 2000 y 2004 (Figura 2), indican variaciones máximas que alcanzan 0.090 mGal en el centro-oeste de la Sierra Chica de Zonda y 0.088 mGal en el sudoeste de la Sierra de Pie de Palo. Los afloramientos cristalinos: Co. Valdivia, Co. Barboza y Pie de Palo, exhiben máximos bien alineados con la falla de basamento que los levanta. Por otro lado, el sur de la Sierra Chica de Zonda muestra estabilidad en los valores de g .

Niveles de aguas subterráneas y g_g

La información gravimétrica se procesó junto con datos de niveles de agua en perforaciones (Base de datos del Instituto Nacional del Agua "INA", San Juan). El efecto gravimétrico debido a variaciones del nivel de aguas subterráneas (g_g) ha sido calculado considerando: a- una permeabilidad del 15% en el acuífero libre (ver ubicación en Figuras 1 y 2) y b- permeabilidad del 2.5% en la región de acuífero confinado (datos cedidos por el INA). Se han calculado correcciones planas, con densidad $1 g.cm^{-3}$, con las que se obtienen: para (a) una variación de $0.006 mGal.m^{-1}$ y para (b) de $0.001 mGal.m^{-1}$.

El INA tomó niveles de aguas subterráneas en Noviembre de 2000, pero no en igual mes de 2004. Las lecturas del INA más próximas a nuestras remediciones (Octubre-Noviembre de 2004) son de mayo de 2005. Estos datos indican una recarga del acuífero con aumentos del orden de 5 m ($g_g = 0.030$ mGal) en los departamentos Capital y Chimbas, de 1 m en Pocito ($g_g = 0.006$ mGal), 1 a 4 metros para 9 de Julio y Las Casuarinas ($g_g = 0.004$ mGal).

RESULTADOS

En la región del acuífero libre (Figuras 1 y 2) es donde se dan las máximas variaciones de las curvas hidrológicas. Si bien no hay mediciones del nivel de aguas subterráneas en Octubre-Noviembre de 2004, se pueden extrapolar desde mediciones en igual época para años anteriores. Datos hidrológicos tomados por el INA en distintos pozos, desde 1981 al 2005, indican que los cambios máximos no superan los 5 metros. Esto implica variaciones de g_g menores que 0.030 mGal.

En el valle del Río San Juan, las diferencias de gravedad (Δg) crudas 2000-2004 (Fig. 2), indican pequeñas variaciones en la zona del acuífero libre, mientras que las máximas Δg se encuentran en zonas de acuífero confinado (ubicado al este del acuífero libre). Esto permite concluir que las variaciones de gravedad encontradas (Fig. 2) se deben, principalmente, a efectos sismotectónicos.

La Figura 1 muestra los hipocentros de sismos corticales ($z < 50\text{km}$) de magnitud mayor que 3, registrados en igual periodo, y la ubicación de fallas activas (Base de datos del INPRES). Puede apreciarse una alta correlación entre nidos de actividad sísmica y máximas variaciones de gravedad.

Las Δg se calcularon restando a los valores observados en 2000 los datos de g del año 2004. De esta forma, despreciando g_s , pueden correlacionarse con las variaciones altimétricas sufridas por la red en ese período.

Además, las Δg se refirieron a la estación de gravedad absoluta del IGSV, ubicada al norte de la Sierra Chica de Zonda, por lo que las diferencias son relativas a ella.

Desde estos datos se puede concluir que hubo un ascenso generalizado de los puntos situados al oeste de la Sierra Chica de Zonda, alineados con la falla que la levanta y que el centro de esta ($68.75^\circ\text{W}; 31.75^\circ\text{S}$) fue el tramo de mayor actividad, como lo corroboran nidos de sismos en este periodo (Fig. 1). Allí, empleando la Expresión 2, puede esperarse un ascenso altimétrico del orden de 15 cm. La línea este-oeste de puntos fijos que atraviesa la sierra por el sur (Quebrada de La Flecha) se mantuvo estable.

Los puntos ubicados al norte del río San Juan también ascendieron. En la Red La Laja, las Δg alcanzaron los 0.080 mGal, esto daría un $\Delta h \approx 10\text{cm}$ corregido por efectos de acuífero ($g_g = -6\text{cm}$).

La falla alineada con los cerros Valdivia-Barboza-Pie de Palo, ascendió hasta 0.080 mGal ($\Delta h \approx 16\text{cm} - 2\text{cm} \approx 14\text{cm}$) en $68.38^\circ\text{W}; 31.67^\circ\text{S}$. En Figura 1 puede verse la alta concentración de eventos corticales de magnitud mayor que 3, localizados al sudeste de esa falla, lo que puede justificar estos resultados.

CONCLUSIONES

Se ha establecido una red de control gravimétrico en la región más densamente poblada y de mayor actividad sísmica de la Provincia de San Juan. Los cambios de gravedad registrados entre el año 2000 y 2004 permiten identificar las zonas con mayor movilidad cortical.

Se han podido detectar cambios de gravedad que indican máximos en: a- centro-oeste de la Sierra Chica de Zonda (0.090 mGal); b- de 0.080 mGal en el este de la Sierra de Villicum (Falla La Laja); c) 0.088 mGal al sudoeste de la Sierra Pie de Palo, sobre la estructura que une esta sierra con los cerros Barboza y Valdivia.

Si atribuimos los cambios de g enteramente a cambios topográfico, podemos inferir un ascenso altimétrico del orden de los 10 cm para a, b y c. Los sismos corticales de magnitud mayor que 3 muestran altas concentraciones en estas zonas.

Agradecimientos: Este trabajo fue soportado con subsidios provenientes del CICITCA (211E373 y 21E621), PICTR2003-00166 SEPCyT y PIP 6044 CONICET.

REFERENCIAS

- Alvarado, P. and S. Beck, 2006. Source characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8). *Earth and Planetary Science Letters* 243: 615–631.
- Baldis, B., R. Martínez, C. Villegas, M. Y. Pereyra y A. Perez, 1990. Estructura Provincialismo geológico y unidades tectonoestratigráficas. XI Cong. Geol. Arg.: 186-211.
- Cahill, T. and B. Isacks, 1992. Sismicity and Shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geof. Research*, v. 97:17503-17529.

- Herrada, A., J. Sisterna, S. Miranda, D. Del Cogliano y R. Perdomo, 2001. Desarrollo de una metodología para determinar movimientos tectónicos en la Sierra Chica de Zonda- Provincia de San Juan. Argentina. VIII Congreso Colombiano de Geología. Manizales- Colombia. Actas.
- Jordan T.E. and R.W. Allmendinger, 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: A modern analogue of rocky mountain foreland deformation. *American Journal of Science*, 286: 737-764.
- Kendrick, E., M. Bevis, R. Smalley Jr., B. A. Brooks, R. Barriga, E. Lauría and L.P. Souto, 2003. The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *J. South Am. Earth Sci.* 16: 125–131.
- Kuo J.T., J.H. Zheng, S.H. Song and K.R. Liu, 1999. Determinación de epicentroides de terremotos por inversión de variaciones de datos gravimétricos en la region de BTTZ, China. *Tectonophysics* 312:267-281.
- Lambert, A. and D. Bower, 1991. Constrain on the usefulness of gravimetry for detecting precursory crustal deformations. *Tectonophysics*, 193: 369-375.
- Kay S., C. Mpodozis, V. Ramos and F. Munizaga, 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28° to 33°S), in: R.S. Harmon, C.W. Rapela (Eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*, Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 265: 113–137.
- Perucca, L.P. y J.D. Paredes, 2002. Peligro sísmico en el departamento Albardón y su relación con el área de fallamiento La Laja, provincia de San Juan. *J. Argentine Geol. Assoc.* 57: 45–54.
- Ramos, V. A., E.O. Cristallini and D.J. Pérez, 2002. The Pampean flatslab of the central Andes. *J. South Am. Earth Sci.* 15: 59–78.
- Regnier, M., J. Chiu, R. Smalley, B. Isacks and M. Araujo, 1994. Crustal Thickness variation in the Andean Foreland, Argentina, from Converted Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4:1097-1111.
- Sisterna, J. y F. Ruiz, 1997. Control Topogeodésico de La zona de Fallamiento La Laja - Departamento Albardón - San Juan. II Jornadas de Geología de la Precordillera, San Juan. Actas: 167-171.
- Smalley, R., J. Pujol, M. Regnier, J. Chiu, B. Isacks, and N. Puebla, 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and its implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics*, 12(1): 63-76.
- Torge, W., L. Timmen, R. H. Röder and M. Schnül, 1994. The IFE Absolute Gravity Program “South America“ 1988-1991, Veröff, Deutsche Geod. Komm. Bei der Bayer. Akad. D. Wissensch., Teihe B299, München.
- Triep, E. y C. Cardinali, 1984. Mecanismos de sismos en las Sierras Pampeanas occidentales. IX Congr. Geol. Arg., Bariloche, III: 61-80.
- Volponi, F. S., J. Sisterna y J. A. Robles, 1982. Orogenia, fuerzas gravitacionales y fuerzas tectónicas. V Congreso Latinoamericano de Geología. Actas III: 719-730.