



## Cambios periódicos de gravedad vinculados con tectónica activa en la Precordillera Oriental, San Juan, Argentina

Francisco Ruiz, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ, Argentina.  
Mario Gimenez, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ y CONICET, Argentina.  
Antonio Introcaso, Instituto de Física de Rosario (UNR y CONICET), Argentina.  
Patricia Martínez, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ y CONICET, Argentina.  
Laura Cornaglia, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ, Argentina.  
Flavia Leiva, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ, Argentina.  
Jorge Sisterna, Instituto Geofísico Sismológico FCEF N – UNSJ, Argentina

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The gravity signal contains information regarding changes in density at all depths and can be used as a proxy for the strain accumulation in fault networks.

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 seismotectonic activity. The network is composite for 50 points well materialized in the field, and extends over an about 2700 km<sup>2</sup> area centered in the San Juan city of Argentina. These bench marks were linked with precise gravity measurements carried out during the years 2000, 2004, 2007 and 2008. The gravity changes 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 +0.100 mGal occurs in the Southwest of the Pie de Palo range, Barboza and Valdivia interior mountains. B) A generalized descent in gravity changes to the east of Sierra Chica de Zonda range (topographic uplift). C) The South of the Sierra Chica de Zonda range shows a marked quiescence in the bench marks situated to the west and high changes (-0.090 mGal) to the East of the range. D) A generalized gravity down (upward zone) in the stations situated north of the San Juan River in the interval 2004-2000.

If we assign the gravity variations as caused entirely by topographic changes, the height variations would be in the neighborhood of 20 cm in the last 10 years.

### Introducción

La ciudad de San Juan se ubica en la región de mayor actividad sísmica de la Argentina. En los últimos sesenta y cinco años sufrió tres terremotos destructivos (1944,

1952 y 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 en 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; Kay et al., 1991; Ramos et al., 2002, Vergés et al., 2007), 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; Kendrick et al., 2006).

Ruiz et al. (2008), propusieron una metodología ágil para monitorear cambios de gravedad de origen sismotectónico, mediante remediciones gravimétricas (g) en una red (Red G1) con 50 puntos fijos con coordenadas GPS, Figura 1. Estos autores encontraron variaciones del campo gravitatorio entre los años 2000 y 2004, correlacionadas con estructuras tectónicas activas enterradas en el subsuelo del Valle de Tulum.

Se sabe que las mediciones precisas de gravedad empleando gravímetros geodésicos son capaces de detectar variaciones del orden de  $\pm 0.010$  mGal (Lambert y Bower, 1991; Hayes et al., 2006). Los gravímetros son sensibles tanto a desplazamientos verticales de la superficie topográfica, como a variaciones de densidad en el interior de la tierra. En ausencia de mediciones topográficas simultáneas a las gravimétricas, se acepta que un ascenso topográfico, en general, se ve reflejado en una disminución de la gravedad observada y viceversa (Lambert y Bower, 1991; Arnet et al., 1997; Introcaso et al., 1999).

En el presente trabajo se analizan los cambios gravimétricos observados en la Red G1 a partir de remediciones de precisión efectuadas en los años 2008, 2007, 2004 y 2000. Las variaciones gravimétricas encontradas están relacionados con las estructuras más activas en el subsuelo del Valle de Tulum. En este período se ha registrado una alta tasa de actividad sísmica cortical, de magnitud mayor que 3, en la región.

## Metodología

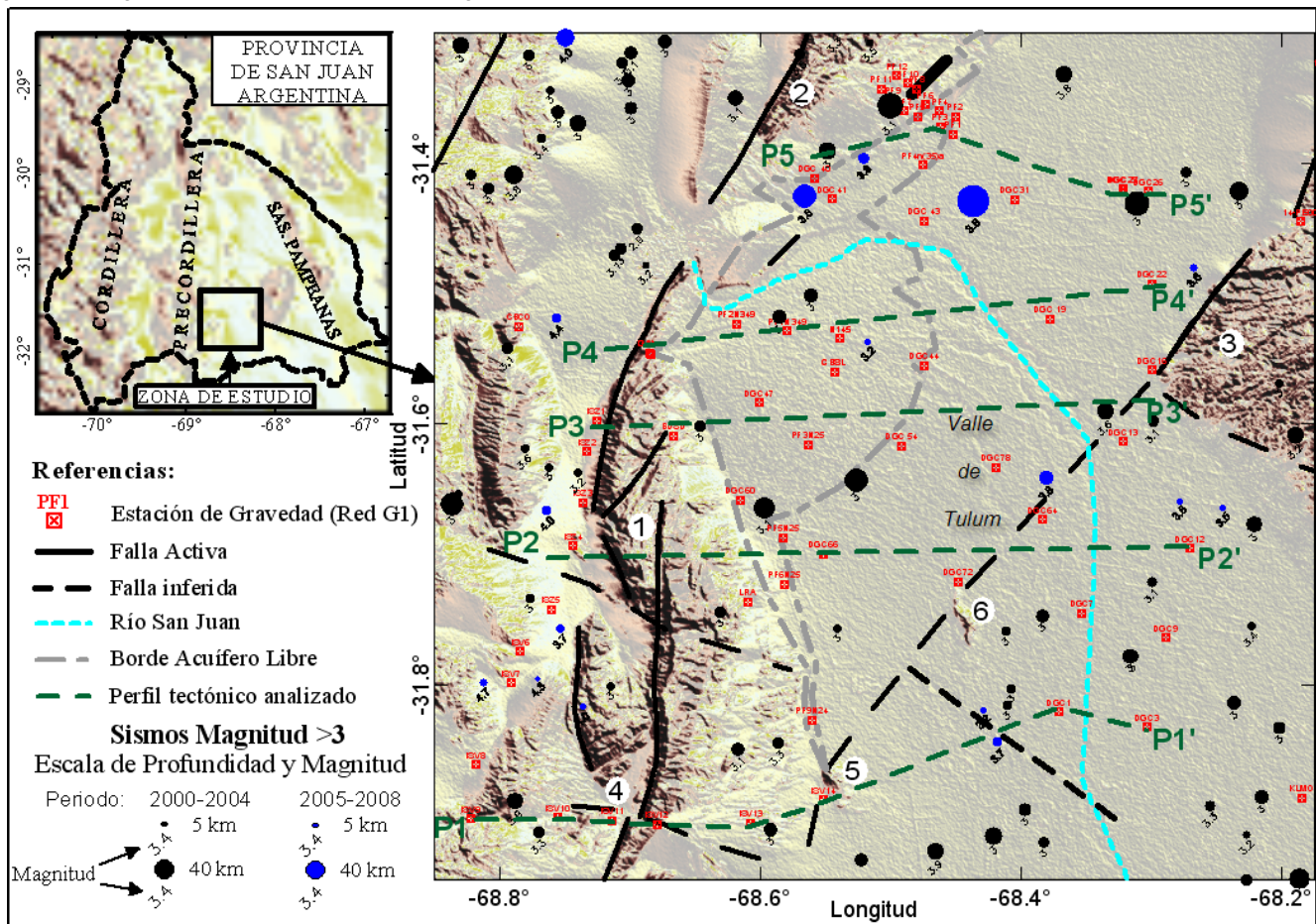
Los puntos fijos de la Red G1 (Figura 1), fueron vinculados con mediciones precisas de gravedad en campañas realizadas en los años 2000, 2004, 2007 y 2008. Los valores de gravedad de cada estación se refirieron a la estación del Instituto Geofísico Sismológico (Universidad Nacional de San Juan), que posee determinaciones de gravedad absoluta en los años 1990 y 2006 y vinculaciones periódicas con una estación de control gravimétrico ubicada en una región tectónicamente estable (Nodal 147, Chepes). El campo de variaciones relativas de gravedad se obtuvo mediante las diferencias de las lecturas 2008-2007, 2008-2004 y 2008-2000, respectivamente. Este muestra relaciones consistentes con la actividad sísmica de magnitud mayor que 3, abundante en este período (Figura 1).

En las mediciones se empleó un gravímetro geodésico automático, con resolución 0.005 mGal. Para asegurar la precisión del instrumento ( $g_n = \pm 0.010$  mGal) en cada campaña se realizaron controles de deriva instrumental y controles de calibración (Ruiz et al., 2008). Además, en 2006 se calibró el aparato con un gravímetro absoluto de precisión 0.0001 mGal y desde 2008 se controla con un gravímetro geodésico automático de última generación.

En cada campaña de medición gravimétrica se dividió a la Red G1 en circuitos cerrados (1 circuito cerrado por día de medición). Los cierres de cada circuito no superaron la precisión del gravímetro ( $\pm 0.010$  mGal), precisión mantenida en el cierre total de los circuitos cerrados de medición de la red. En cada circuito las determinaciones de  $g$  se efectuaron por el método del rulo con, por lo menos, tres ciclos de medición por estación (3 repeticiones).

Para cada ciclo de medición se registraron lecturas de  $g$  durante más de 20 minutos (1 lectura por segundo). El valor de gravedad de cada estación se determinó promediando los últimos 5 minutos de cada ciclo para eliminar posibles cambios de tara del gravímetro provocados en el transporte del instrumento. Los valores medidos fueron corregidos por marea ( $g_t$ ), variaciones de temperatura, desnivel y vibraciones.

Para evaluar los efectos gravimétricos debidos a variaciones de nivel en las aguas subterráneas ( $g_g$ ), se efectuaron mediciones simultáneas de gravedad y del nivel estático de las aguas subterráneas en pozos cercanos a algunos puntos de la Red G1. Resultados preliminares de estos estudios indican que  $g_g$  no supera en ningún caso los 0.025 mGal.



**Figura 1:** Izquierda: Ubicación de la zona de estudio. Derecha: modelo digital del terreno (SRM 90m), ver referencias. Cuadrados rojos: puntos fijos de la Red G1. Círculos: hipocentros de sismos  $M > 3$ , período 2000-2008. 1: Sa. Chica de Zonda; 2: Sa. de Villicum; 3: Sa. Pie de Palo; 4: Qda. La Flecha; 5: Co. Valdivia; 6: Co. Barboza.

## Resultados

Las diferencias de gravedad de cada estación ( $\Delta g$ ) entre los años 2000, 2004, 2007 y 2008, se analizan en 5 perfiles de dirección aproximadamente este-oeste (Figura 2). Las  $\Delta g$  se calcularon restando a los valores observados en 2008 los datos de  $g$  medidos en los años 2007, 2004 y 2000, respectivamente. Las variaciones gravimétricas pueden correlacionarse en forma inversa con variaciones altimétricas sufridas por la red en ese período, de tal manera que un ascenso/descenso topográfico, en general, se vería reflejado en una disminución/aumento de la gravedad observada (Arnet et al., 1997, Introcaso et al., 1999).

El campo de variaciones de  $g$  durante los años 2008 a 2004 indica baja movilidad cortical en el norte de la Sierra Chica de Zonda (Perfiles P3-P3' y P4-P4', Figura 2), en el período 2004-2000, los cambios de  $g$  aumentan abruptamente hacia el este de estos perfiles, alcanzando variaciones acumuladas máximas de 0.080 mGal en el período 2000-2008. La actividad sísmica revela nidos de sismos superficiales en esta región, con varios eventos de magnitud superior a 3.

En todos los perfiles se aprecia que la gravedad aumenta hacia el oeste de la falla inversa Villicum-Zonda que levanta a las sierras homónimas. Desde el punto de vista topográfico, ésto se debe al descenso altimétrico del labio hundido de la falla.

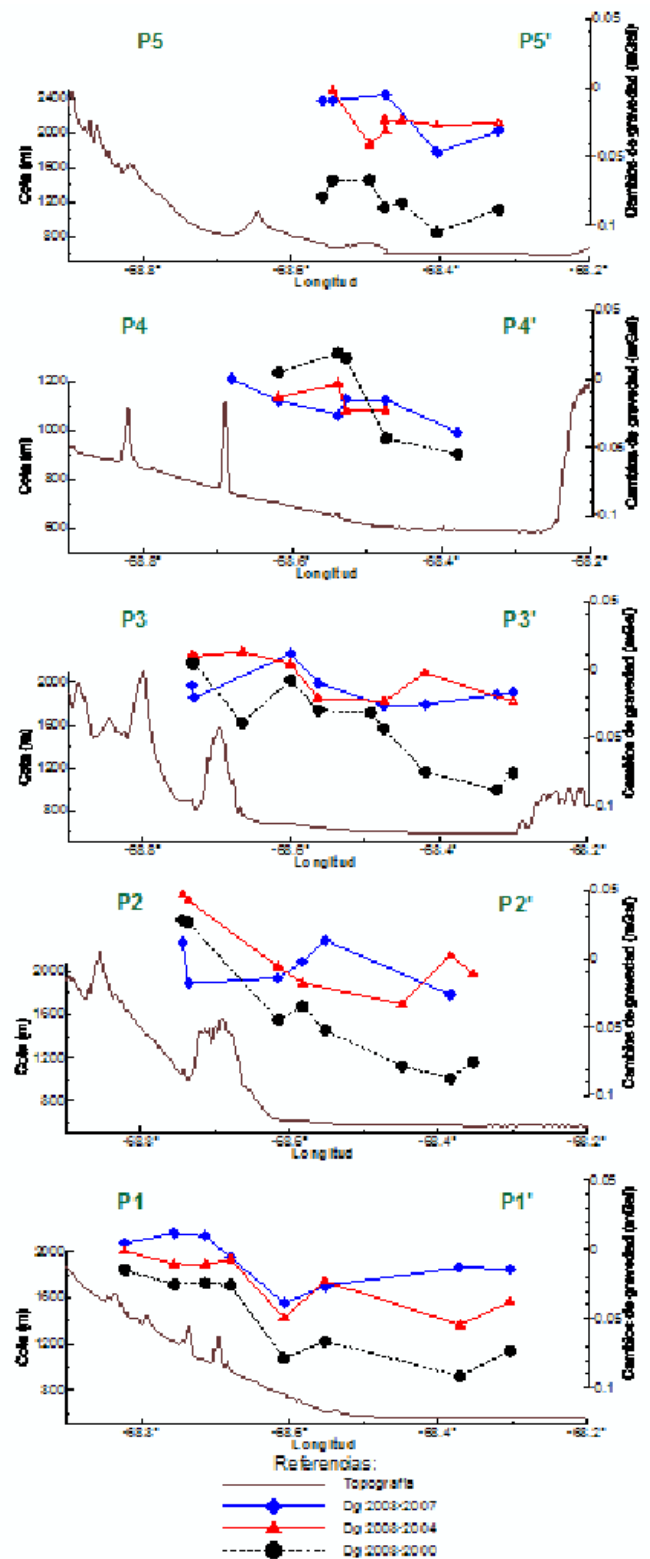
Por otro lado, el sur de la Sierra Chica de Zonda (Quebrada de La Flecha, P1-P1') muestra un ritmo lento y uniforme de disminución de  $g$  en las 4 estaciones del oeste, mientras que desde la quinta estación (Cerro Valdivia) hacia el este, se aprecia un marcado salto gravimétrico desde el año 2007, acumulando un descenso de  $g$  de -0.080 mGal en el período 2008-2000.

En el perfil P2-P2', puede apreciarse un descenso gravimétrico (posible ascenso topográfico) de todas las estaciones ubicadas al este de la Sierra Chica de Zonda. El 22-02-2007, ocurrió un sismo de magnitud 4.7 que puede explicar el  $\Delta g$  2008-2007 al oeste de la sierra.

La marcada disminución de  $g$  en todas las estaciones ubicadas al este de la línea que une los afloramientos del basamento cristalino de Co. Valdivia, Co. Barboza y Pie de Palo, manifiesta una notable actividad de esa estructura, especialmente desde el 2007 al 2000, según puede apreciarse en nidos de sismos superficiales ubicados al este del mencionado lineamiento (período 2004-2000).

Por otro lado, el perfil ubicado al norte del Río San Juan (P5-P5') indica una disminución gravimétrica generalizada en los puntos situados al este de la Falla La Laja (fuente del terremoto que destruyó a la ciudad de San Juan el 15-01-1944).

Si atribuimos los cambios de gravedad enteramente a cambios topográficos, las variaciones altimétricas máximas pueden alcanzar los 25 cm durante los últimos 10 años. Estos valores se obtienen aplicando el valor medio del gradiente vertical de gravedad medido en el presente estudio (0.2736 mGal/m). A partir de los resultados encontrados se han propuesto mediciones GPS simultáneas con las determinaciones gravimétricas de la próxima campaña 2009.



**Figura 2:** Cambios de gravedad en la Precordillera Oriental y límite oeste de las Sierras Pampeanas Occidentales sanjuaninas, determinados en los períodos 2008-2007, 2007-2004, 2004-2000. Ver ubicación de los perfiles en Figura 1.



## 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 2008 permiten identificar las zonas con mayor movilidad cortical. Los cambios de  $g$  indican posibles variaciones altimétricas que superarían los 20 cm, que deben ser corroboradas con futuras remediciones GPS.

Los resultados más sobresalientes, indican aumentos gravimétricos en los puntos ubicados en el labio hundido de la Falla Villicum-Ullum-Zonda y disminución gravimétrica de las estaciones del este de esta estructura. Además se encuentra que la mayor actividad se relaciona con el fallamiento que une el borde sudoeste de la Sierra Pie de Palo con los cerros Barboza y Valdivia.

Los sismos corticales de magnitud mayor que 3 muestran altas concentraciones en estas zonas.

## Agradecimientos

Este trabajo fue soportado con subsidios provenientes del CICITCA-UNSJ (21E621 y 21E810) y PICTR2005-33630 ANPCyT.

## 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.
- Arnet, F., H.-G. Kahle, E. Klingelé, R. B. Smith, C. M. Meertens, and D. Dzurisin**, 1997. Temporal Gravity and Height Changes of the Yellowstone Caldera, 1977 - 1994, *Geophys. Res. Lett.*, 24(22), 2741–2744.
- Baldis, B., R. Martínez, C. Villegas, M. Y. Pereyra y A. Pérez**, 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.
- Hayes, T. J., K. F. Tiampo, J. B. Rundle, and J. Fernández**, 2006. Gravity changes from a stress evolution earthquake simulation of California, *J. Geophys. Res.*, 111, B09408, doi:10.1029/2005JB004092.
- Introcaso, A.; J. Robles, S. Miranda, F. Volponi, J. Sisterna, P. Martínez, y M. Gimenez**, 1999. Cambios Temporales de  $g$  y  $h$  sobre la zona sismotectónica de las Sas. Pampeanas de Pie de Palo, de la Huerta y Chepes. Arg.. En Antonio Introcaso Ed.: Contribuciones a la Geodesia en la Argentina de fines del siglo XX. Homenaje a Oscar Parachú. UNR Editora, 243-252
- 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.
- 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.
- Kendrick, E., B. A. Brooks, M. Bevis, R. Smalley Jr., E. Lauria, M. Araujo y H. Parra**, 2006. Active orogeny of the South-Central Andes studied with GPS Geodesy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (4): 555-566
- 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.
- 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.
- Ruiz, F., Laplagne, A., Gallego G., A. e Introcaso, A.**, 2008. Variaciones de gravedad en el Valle de Tulum, San Juan: aportes a la caracterización sismotectónica. *GEOACTA*, 33: 115-122.
- 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.
- Triep, E. y C. Cardinali**, 1984. Mecanismos de sismos en las Sierras Pampeanas occidentales. IX Congr. Geol. Arg., Bariloche, III: 61-80.
- Vergés, J., V. A. Ramos, A. Meigs, E. Cristallini, F. H. Bettini, and J. M. Cortés**, 2007. Crustal wedging triggering recent deformation in the Andean thrust front between 31\_S and 33\_S: Sierras Pampeanas-Precordillera interaction, *J. Geophys. Res.*, 112, B03S15, doi:10.1029/2006JB004287, 22pp.
- 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.