

## Nota Breve

# UNA PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LA MOVILIDAD CORTICAL ACTUAL EN LA SIERRA CHICA DE ZONDA (PRECORDILLERA ORIENTAL DE SAN JUAN): MEDICIONES DE GRAVEDAD EN RED

Silvia MIRANDA, Alfredo HERRADA y Jorge SISTERNA

Instituto Geofísico Sismológico Volponi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Meglioli 1160- S. CP: 5400. Rivadavia. San Juan. Email: smiranda@unsj-cuim.edu.ar

## RESUMEN

Se detallan los requerimientos para el procedimiento de medición de redes precisas de gravedad que permitan obtener una interpretación de los cambios temporales de gravedad observados con relación a movimientos verticales en la corteza. Para Argentina, esta es la primera medición de gravedad en red realizada con fines de monitoreo cortical a escala local. Los vértices de la red prácticamente rodean a la sierra Chica de Zonda (Precordillera Oriental de San Juan) caracterizada como una región de fallamiento activo. El objetivo científico del experimento es el ensayo de esta herramienta geofísica para cuantificar probables deformaciones verticales y/o cambios de masas subsuperficiales vinculados con actividad sísmica.

Palabras Clave: *Monitoreo, movimientos corticales, sismicidad, gravimetría.*

**ABSTRACT:** *A proposal for monitoring the present crustal mobility in Sierra Chica de Zonda (Eastern Precordillera of San Juan): Gravity measurements in a network.*

In an attempt to obtain an interpretation of the observed temporal gravity changes related to crustal vertical motions, we describe a methodology using accurate gravity measurements within a fixed network. In Argentina, this is the first gravity survey measured in a network configuration for crustal monitoring studies at a local scale. The network contains the Sierra Chica de Zonda (San Juan Eastern Precordillera), a region of active tectonics. The main goal is to test a geophysical tool useful to quantify probable vertical ground deformations and/or subsurface mass changes associated with seismic activity.

Keywords: *Monitoring, crustal motions, seismicity, gravimetry.*

## INTRODUCCIÓN

El estilo de deformación en la Precordillera Oriental de San Juan ha sido caracterizado, en especial a través de métodos geológicos, como dominado por fallas inversas buzantes al este tanto a nivel basal (Allmendinger *et al.* 1990) como más superficial (Perucca y Paredes 2004) para las que se ha estimado un alto potencial sísmico (Castano 1993).

Smalley *et al.* (1993), en base a la distribución de sismicidad relocalizada, reconocen para esta región tres segmentos en dirección norte-sur claramente diferenciados. En el segmento sur, que abarca gran parte de la sierra Chica de Zonda (al sur de la quebrada de Zonda) (Fig. 1), la sismicidad en la Precordillera Oriental resulta difusa y pobremente definida para períodos cortos de observación (Smalley *et al.* 1993, Triep *et al.* 2002), y

por lo tanto no es clara la relación entre la geología de superficie y las fallas activas de basamento. En esta zona las evidencias de deformación cuaternaria se distribuyen en dos fajas paralelas a ambos lados de las sierras Chica de Zonda (Fig. 1) y Pedernal más al sur (Bastías 1986). El límite occidental lo constituye la falla de Zonda, de carácter inverso buzante al este (Ortiz y Zambrano 1981) con probable actividad

sísmica (Volponi y Yacante 1981). En el borde este se encuentra el sistema de fallamiento La Rinconada (Fig. 1) integrado por varios tramos de fallas inversas activas subparalelas que inclinan entre 20 y 40° al este (Perucca y Paredes 2004). El epicentro del sismo del 11 de junio de 1952,  $M_s = 7,0$  (INPRES 2006), ha sido vinculado a fallas modernas de este sistema de fallamiento (Castano 1993). Recientemente, Alvarado y Beck (2006) han determinado los parámetros de fuente de este sismo, asociando especulativamente dicho evento con las citadas estructuras de la sierra Chica de Zonda. Más al sur, la falla de la Quebrada de la Flecha (Fig. 1), con dirección aproximadamente este-oeste, tiene reconocida componente dextral de rumbo y bloque levantado hacia el sur, para la cual Paredes (1986) ha asignado una edad de fines del Terciario o durante el Cuaternario para los últimos movimientos. Los estudios de las variaciones temporales del campo de gravedad terrestre dirigidos al monitoreo de movilidad cortical vertical se basan en la detección de los cambios de gravedad debidos a desplazamientos verticales y/o redistribuciones de masa en zonas de alta sismicidad. Las observaciones gravimétricas no pueden separar la componente de movimiento vertical de la componente de movimiento de masa (si existiera). No obstante, esta separación es posible mediante una combinación de nivelación (geométrica, GPS) y mediciones de gravedad precisas realizadas en forma simultánea y sistemática en el tiempo (Torge 2001). Las variaciones de altitud  $\Delta H$  y los cambios de gravedad  $\Delta g$  entre dos épocas de medición permiten determinar la relación temporal observada para  $\Delta g / \Delta H$ . Suponiendo una relación lineal entre cambios de gravedad y altura,  $\Delta g / \Delta H$  toma valores de entre  $\sim -0,35$  mGal/m y  $\sim -0,15$  mGal/m (Jachens 1978). Para un modelo de sólo movimiento vertical  $\Delta g / \Delta H \sim -0,3$  mGal/m (gradiente de aire libre) y para un modelo de sólo movimiento de masas  $\Delta g / \Delta H \sim -0,2$  mGal/m (gradiente de Bouguer). Así, las mediciones de  $\Delta g / \Delta H$  se pueden usar para discriminar

entre estos dos modelos extremos.

En nuestro país, los más completos estudios geodésicos (gravedad y nivelación) de deformaciones recientes de corteza a escala local relacionados con actividad sísmica se han llevado a cabo para monitorear el área epicentral del sismo del 23 de noviembre de 1977,  $M_s = 7,4$  (INPRES 2006). Las observaciones provenientes de remediciones sucesivas sobre la línea N-23 del Instituto Geográfico Militar (IGM) que vincula las ciudades de San Juan y Chepes, con datos de altitudes desde 1938 y valores de gravedad desde 1970, han permitido el seguimiento de las deformaciones en las etapas presísmica, cósmica y post-sísmica (Volponi *et al.* 1984, Introcaso *et al.* 1998).

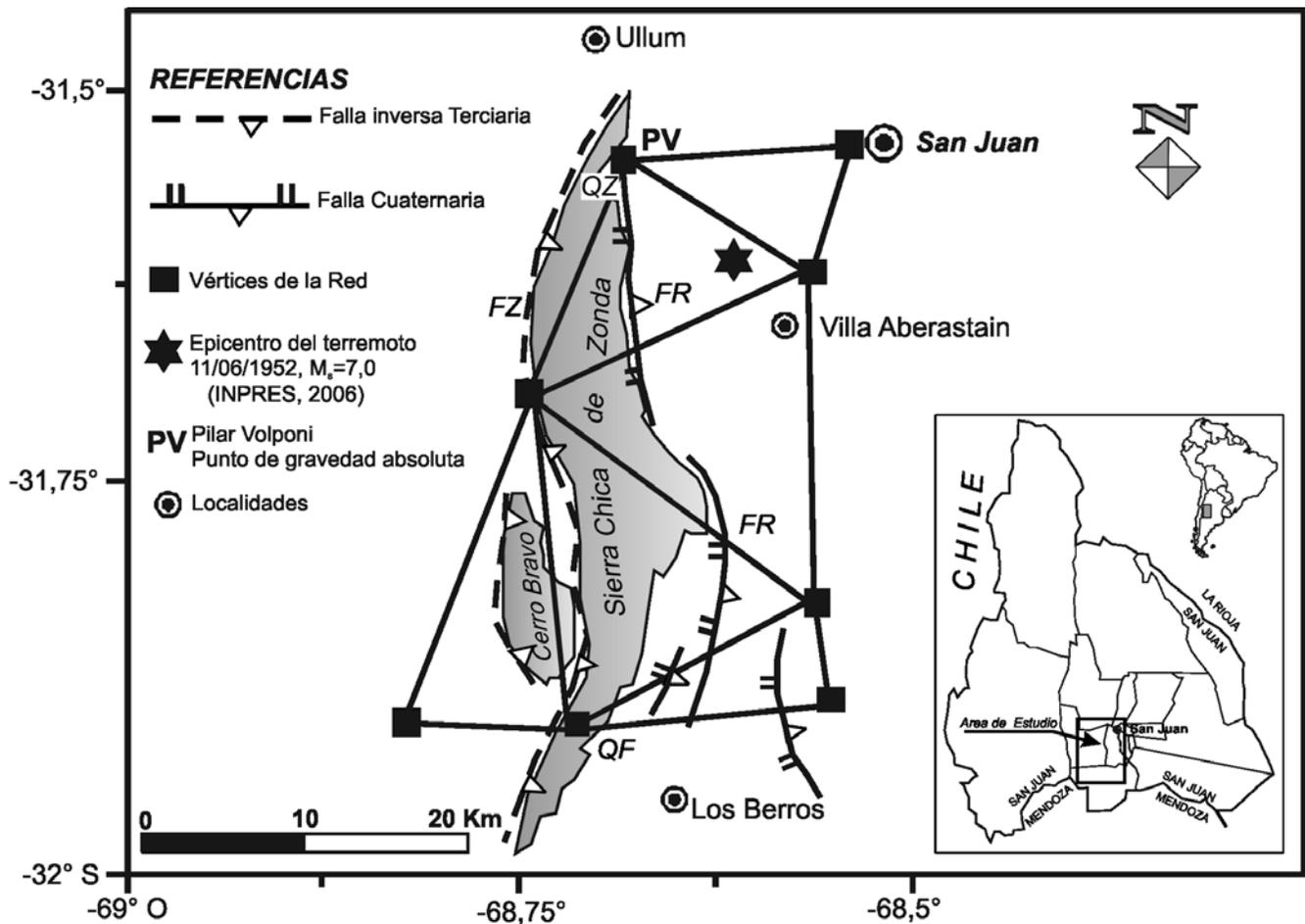
En el año 1997, con el objeto de monitorear las deformaciones corticales, investigadores del Programa de Geodesia y Movilidad Cortical del Instituto Geofísico Sismológico Volponi (Universidad Nacional de San Juan) establecieron una red geodésica de control cuyos vértices circunscriben gran parte de la sierra Chica de Zonda (Fig. 1). Se incluyeron puntos fijos de IGM al este y norte, mientras que en los flancos oeste y sur de la Sierra se materializaron 14 nuevos puntos fijos, con un total de 23, describiendo un perímetro de cerca de 150 km, para cubrir una zona de 45 km x 25 km, aproximadamente. Sisterna *et al.* (2000) realizaron una nivelación GPS con repetición (1998 y 2000), observando importantes desplazamientos de rumbo en la zona de la quebrada de La Flecha (Fig. 1), mientras que movimientos verticales relativos son informados para la zona noroeste (ascenso) con respecto a la parte al sudeste de la sierra. Estos resultados serían consistentes con los obtenidos en el mismo período mediante gravimetría de precisión (Robles *et al.* 2000). Sin embargo, la técnica de observación de gravedad utilizada para dichos relevamientos no reduce errores de medición aleatorios, que en general son de difícil modelado, disminuyendo la calidad de las determinaciones, y por tanto afectando en forma crítica la habilidad del método gravimétrico en la detección de

movimientos verticales asociados a sismicidad. Atendiendo a las dificultades señaladas, en noviembre de 2004, se realizaron mediciones de gravedad en red en ocho vértices de la red geodésica descrita (Fig. 1). En esta contribución se describe la metodología de diseño, medición, cálculo y compensación de la red gravimétrica local y la utilidad de su reocupación a futuro. La red fue proyectada formando cadenas de triángulos con el objeto de disponer de determinaciones superabundantes para el posterior ajuste. La red ajustada reúne los requerimientos necesarios para que en futuras reocupaciones sea posible analizar el significado de eventuales cambios de gravedad ( $> 0,03$  mGal) acompañados por posibles cambios de altitud ( $> 10$  cm).

## DISEÑO Y MEDICIÓN DE LA RED GRAVIMÉTRICA LOCAL

Las pautas de diseño estuvieron sujetas a factores logísticos, económicos y de fiabilidad, de modo que, cada vértice: 1) se conectó al menos con tres adyacentes, 2) se ocupó en dos o más ocasiones bajo condiciones disímiles (para identificar errores graves), y 3) cada desnivel gravimétrico inter-estación se midió en dos oportunidades en sentidos opuestos. Este esquema de medición garantiza que los errores aleatorios se distribuyan uniformemente a través de la red, y por lo tanto produzcan incertidumbres uniformes en la solución de los valores de gravedad para cada estación. Como resultado se consigue una red robusta, pues admite dos o más trayectorias independientes entre las distintas estaciones que la conforman. Uno de los vértices (PV en Fig. 1), ubicado en el Instituto Geofísico Sismológico Volponi, corresponde a un punto de la red de gravedad de orden cero de Argentina, de modo que se conoce su gravedad absoluta (Becker *et al.* 1991).

Todos los vértices cuentan con coordenadas en el marco de referencia geodésico argentino POSGAR '94 (latitud, longitud y altura elipsoidal), provenientes de mediciones realizadas con receptores



**Figura 1:** Mapa de ubicación de la zona de estudio. Se indican las principales estructuras cuaternarias y los vértices y lados de la red de gravedad. FZ: Falla de Zonda; FR: Sistema de Fallamiento La Rinconada; QZ: Quebrada de Zonda; QF: Quebrada de La Flecha.

GPS de frecuencia dual y bicódigo (Sisterna *et al.* 2000). Los puntos fijos que materializan la red están monumentados mediante pilares de hormigón con bulón y chapa identificatoria insertados en el coronamiento, para su posterior identificación y reocupación.

La medición de las diferencias gravimétricas se realizó en cooperación con el IGM, utilizando el gravímetro Lacoste y Romberg (LC y R) modelo G, número 043 ( $\pm 0,01$  mGal de precisión), el cual fue previamente calibrado en un rango de casi 2.300 mGal, incluyendo el tramo correspondiente a las latitudes de San Juan. El factor de escala determinado fue de  $0,99842 \pm 0,00026$ . El promedio de

al menos tres lecturas independientes por estación, medidas consecutivamente en el intervalo de cinco minutos, fue adoptado como lectura final. Posteriormente, estos valores fueron corregidos por la componente lineal de deriva instrumental y el efecto predecible de marea debido a la atracción luni-solar. Los aspectos metodológicos en que se basan estas correcciones se describen en Introcaso *et al.* (1998). La calidad de los valores observados es mejor que  $\pm 0,03$  mGal. Este error ha sido influido por los largos intervalos de tiempo ocupados para la vinculación de los vértices más alejados, y en menor medida por la longitud de los lados de la

red. Por otro lado, la medición de la gravedad usando dos o más gravímetros relativos en paralelo mejoraría la precisión final de la red.

#### Ajuste de la red

En este proceso se realiza la compensación de la red de gravedad de manera que todos los desniveles gravimétricos sean ajustados en conjunto. Una vez completada la compensación, en cualquier punto de la red el valor de la gravedad queda unívocamente determinado, dando como resultado una red ajustada que exhibirá coherencia interna. Mediante la compensación se eliminan o ajustan los

efectos de errores accidentales durante la lectura, los remanentes de deriva no lineal, y la parte no predecible de las mareas terrestres. El método de compensación utilizado se basa en una solución de ajuste de mínimos cuadrados (Miranda *et al.* 2004). El mayor peso fue asignado al vértice PV de gravedad absoluta. La precisión en los desniveles gravimétricos ajustados es de  $\pm 0,015$  mGal.

## PRÓXIMAS MEDICIONES

A partir de los trabajos realizados hasta el presente, en futuras reocupaciones de la red gravimétrica local, planificadas para 2007, se está en condiciones de detectar movimientos verticales superiores a 10 centímetros. También se prevé la remediación con determinaciones GPS geodésicas. Luego de disponer de esta información cuantitativa, será necesario contar con datos geológicos y sismológicos de alta calidad para relacionar variaciones temporales de altura y gravedad, y deformaciones de terreno y/o movimientos de masa asociados a sismicidad. Adicionalmente, otras técnicas podrían contribuir a una mejor caracterización de las deformaciones verticales. Entre ellas podemos citar: gravimetría absoluta, mediciones de gradiente vertical de gravedad, nivelación geométrica clásica, determinaciones de mecanismos de foco y relocalizaciones de hipocentros como las obtenidas por Alvarado y Beck (2006). El análisis combinado de este conjunto de datos independientes (gravedad, nivelación, sismología y geología), midiendo las deformaciones antes, durante, y después de un sismo, podría ser usado para modelar la geometría del fallamiento (visible en superficie o no), proveyendo también una descripción de la deformación entre sismos sucesivos (Larson 1995, Hudnut 1995).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a los árbitros Antonio Introcaso y Patricia Alvarado por sus valiosos y oportunos comentarios. El presente trabajo se ha

realizado en el marco de los proyectos 21 E/354 UNSJ, 21E/363 UNSJ y ANPCyT PICT N° 07-15163.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Allmendinger R., Figueroa, D., Zinder, E., Beer, J., Mpodozis, C. e Isacks, B. L. 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30° latitude. *Tectonics* 9, 789-809.
- Alvarado P. y Beck S. 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. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.015.
- Bastías, H. 1986. Fallamiento cuaternario en la región sismotectónica de Precordillera. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (inédito), 147 p., San Juan.
- Becker, M., Groten, E., Araneda, M., Cerrato, A., Starowinsky, M., Csapo, G., Hirsch, O. y Volponi, F. 1991. Monitoring of gravity variations in the Southern Central Andes. En Torge W. (ed.). *Recent Geodetic and Gravimetric research in Latin America*. Springer-Verlag, 184-191, Berlín.
- Castano J. C. 1993. La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan, INPRES, Publicación Técnica 18, 46 p., San Juan.
- Hudnut, K. W. 1995. Earthquake geodesy and hazard monitoring. *Review of Geophysics* 33 (Suppl.): 249-255.
- INPRES 2006. Listado de terremotos históricos ([www.inpres.gov.ar](http://www.inpres.gov.ar)).
- Introcaso, A., Robles, J., Sisterna, J., Miranda, S. 1998. New temporal changes of 'g' and 'h' on the seismotectonic zone of Argentine Pampean Ranges: Pie de Palo, de la Huerta and Chepes. Actas 8th. Congress IAEG (International Association of Engineering Geology and the Environment), 2: 721-726, Vancouver.
- Jachens, R. C. 1978. Temporal gravity changes applied to studies of crustal deformation. En Evernden, J. F. (ed.) *Proceedings of Conference 7, Stress and strain measurements related to earthquake prediction*. U.S. Geological Survey Open-File Report

79(370): 224-243.

- Larson, K. M. 1995. Crustal deformation. *Review of Geophysics* 33 (Suppl.): 371-377.
- Miranda, S., Herrada, A. y Sisterna, J. 2004. Redes de Gravedad/Nivelación. Diseño, Medición, Cálculo y Compensación de una Red Experimental Local. En Miranda, S., Herrada, A. y Sisterna, J. (eds.) *Tópicos de Geociencias. Un volumen de estudios sismológicos, geodésicos y geológicos en homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi*, Editorial UNSJ: 189-213, San Juan.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. J. 1981. La Provincia Geológica Precordillerana Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Paredes, J. 1986. Geología del Cuaternario de la sierra Chica de Zonda, con especial consideración de la tectónica moderna. Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (inédito), 107 p., San Juan.
- Perucca, L. y Paredes, J. 2004. Descripción del Fallamiento Activo en la Provincia de San Juan. En Miranda, S., Herrada, A. y Sisterna, J. (eds.): *Tópicos de Geociencias. Un volumen de estudios sismológicos, geodésicos y geológicos en homenaje al Ing. Fernando Séptimo Volponi*, Editorial UNSJ: 269-309, San Juan.
- Robles, J., Ruiz, F., Miranda, S., Martínez, M., Giménez, M. y Sisterna, J. 2000. Cambios locales de gravedad relacionada con la actividad sismotectónica de San Juan. 20° Reunión Científica de Geofísica y Geodesia, Mendoza.
- Sisterna J., Herrada A., Robles J., Del Cogliano D. y Perdomo R. 2000. Medición de movimientos tectónicos en la Sierra Chica de Zonda. San Juan, Argentina. 20° Reunión Científica de Geofísica y Geodesia, Actas en CD, 6 p., Mendoza.
- Smalley R., Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J. M., Chatelain, J.L., Isacks, B.L., Araujo, M. y Puebla, N. 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behaviour. *Tectonics* 12: 63-76.
- Torge, W. 2001. *Geodesy*. 3rd. Edition, De Gruyter. 416 p., Berlín.
- Triep, E., Quiroga, M., Bilbao, S., Alvarado, P.,

Ávila, C., Lince Klinger, F., López, P., Olivares, C., Pereyra, M., Plasencia, M., Rivas, H., Ruiz, F., Sabbione, N., Sierra, G., Staff, C., Suárez, E. y Vergara, M. 2002. Aspecto regional de la distribución de sismos de pequeña magnitud ( $3,0 \leq M < 3,5$ ) y microsismicidad ( $M < 3,0$ ) obtenidos de una red temporal de estaciones sismológicas en el centro-sur de la Provincia de San Juan. XV Congreso Geológico Argentino, Actas CD-ROM. (artículo 249) 6p.

Volponi, F., Quiroga, M., Robles, A. y Sisterna, J. 1984. El terremoto de Caucete del 23 de noviembre de 1977. Publicación Técnica Instituto Sismológico Zonda, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, 110 p., San Juan.

Volponi, F. y Yacante, M. 1981. La actividad sísmica en la Sierra Chica de Zonda. Antes y después del llenado del dique de Ullum. Publicación Técnica Instituto Sismológico

Zonda, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, 31 p., San Juan.

Recibido: 18 de noviembre, 2005

Aceptado: 20 de abril, 2006