

## RESPUESTA INSTRUMENTAL DEL GRAVÍMETRO SCINTREX AUTOGRAV CG-5 (S/N 40484) EN MODOS CONTINUO Y RELEVAMIENTO

## INSTRUMENTAL RESPONSE OF SCINTREX AUTOGRAV CG-5 (S/N 40484) GRAVITY METER IN CONTINUOUS AND SURVEY MODES

Silvia Miranda<sup>(1)(2)</sup>, Alfredo Herrada<sup>(2)(3)</sup>, María Cristina Pacino<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geofísica y Astronomía. FCEF. Universidad Nacional de San Juan.

([smiranda@unsj-cuim.edu.ar](mailto:smiranda@unsj-cuim.edu.ar))

<sup>(2)</sup> Instituto Geofísico Sismológico Volponi. FCEF. Universidad Nacional de San Juan

<sup>(3)</sup> Departamento de Agrimensura. FI. Universidad Nacional de San Juan. ([aherrada@unsj.edu.ar](mailto:aherrada@unsj.edu.ar))

<sup>(4)</sup> CONICET- Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.  
Pellegrini 250. 2000 Rosario. Santa Fe. Argentina. ([mpacino@fceia.unr.edu.ar](mailto:mpacino@fceia.unr.edu.ar))

### RESUMEN

Debido a sus características técnicas y su simplicidad de medición, el gravímetro automático Scintrex CG-5 es usado por una variada gama de usuarios. Diversas investigaciones han demostrado que el desempeño de cada gravímetro debe ser evaluado particularmente, puesto que la respuesta de cada instrumento es afectada de forma diferente por factores externos, dando lugar a residuos que podrían ser del orden de la precisión demandada. En este trabajo, para el gravímetro Scintrex CG-5 S/N 40484: 1) Se investigó en condiciones de laboratorio para el modo continuo, la influencia sobre los registros gravimétricos de variables meteorológicas (presión y temperatura atmosféricas). También se determinó la deriva instrumental de largo plazo (registros de 35 días). 2) En el modo relevamiento se llevó a cabo una calibración, una determinación de gradiente vertical de gravedad local y mediciones sobre puntos situados en la provincia de San Juan. Las diferencias de gravedad entre estaciones y los parámetros del gravímetro fueron estimadas mediante un ajuste de red.

En base a nuestros resultados, concluimos que este instrumento podría detectar en modo continuo (e.g., movilidad cortical, hidrogeología, etc.) o en modo relevamiento, variaciones de gravedad con exactitudes de algunos microgales. En ambos casos es necesario seguir un adecuado protocolo de medición y postprocesamiento de datos.

**Palabras clave:** microgravimetría, gravimetría relativa, gravímetros automáticos

### ABSTRACT

Due to its technical characteristics and simplicity of measurement, the automatic gravimeter Scintrex CG-5 is used by a wide range of users. Several investigations have shown that the performance of each gravimeter must be assessed in particular, since the response of each instrument is affected differently by external factors, giving rise to residuals that could be of the order of the demanded accuracy. In this work, for the gravimeter Scintrex CG-5 S/N 40484: 1) It was investigated under laboratory conditions for the continuous mode, the influence on gravimetric records of meteorological variables (atmospheric pressure and temperature). The long term instrumental drift (35 days records) was also determined. 2) In survey mode was carried out a calibration, a determination of vertical gradient of local gravity, and measurements on points located in the province of San Juan. Gravity differences between stations and the gravimeter parameters were estimated by means of a network adjustment.

Based on our results, we conclude that this instrument could detect in continuous mode (e.g., crustal movements, hydrogeology, etc.) or in survey mode, variations of gravity with accuracies of some microgals. In both cases it is necessary to follow a proper measurement protocol and post-processing of data.

**Keywords:** microgravimetry, relative gravimetry, automatic gravity meters

## INTRODUCCION

El gravímetro Scintrex CG-5 Autograv es un gravímetro relativo del tipo lineal, con una resolución de 1  $\mu\text{Gal}$ , una repetibilidad de menos de 10  $\mu\text{Gal}$  y un rango operacional de más de 8000 mGal (Scintrex Limited, 2009); su diseño incluye una serie de microprocesadores, los cuales posibilitan la automatización de las mediciones y su procesamiento en tiempo real. El gravímetro CG-5 mide a una frecuencia de 6 Hz durante un período de tiempo definido por el usuario, el cual como mínimo es de 1 segundo. Puede utilizarse en dos formas: modo levantamiento para la adquisición de mediciones discretas, y el modo cíclico para el registro continuo de datos. El elemento sensor se basa en un sistema elástico de cuarzo fundido en el cual la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte y una pequeña fuerza electrostática restauradora.

La deriva instrumental (drift) en estos instrumentos, debido al inevitable estiramiento del resorte bajo tensión y su imperfecta recuperación, alcanza algunas décimas de miligal por día. Este drift es en general lineal en el intervalo de unas pocas horas siempre y cuando el transporte sea cuidadoso (Scintrex Limited, 2009), y puede ser removido de las lecturas realizando reocupaciones frecuentes de estaciones; es una característica propia de cada equipo, y en muchos casos su magnitud es variable en el tiempo (Merlet et al., 2008) al igual que el factor de calibración (Bonvalot et al., 1998; Riccardi et al., 2008). En el caso de adquisición continua de datos por largos períodos (ej., monitoreo en zonas volcánicas y sismotectónicas), la correcciones por deriva instrumental son llevadas a cabo por medio de un ajuste polinomial, en general de segundo orden (Gabalda et al., 2003; Merlet et al., 2008).

Los errores en las lecturas de gravedad en una estación dada no sólo son afectados por factores instrumentales (drift, ruido electrónico, efectos de inclinación) sino también por otros de naturaleza ambiental (mareas terrestres, temperatura y presión atmosférica, sismicidad, estabilidad y ruido del sitio, viento). Estos errores son de magnitud variable en el tiempo y deben ser corregidos para asegurar la repetibilidad de las mediciones (Bonvalot et al., 1998). Asimismo, varios estudios han demostrado que los mismos factores ambientales afectan de modo diferente a cada instrumento en particular (Bonvalot et al., 1998).

En este trabajo se presentan los resultados de los estudios llevados a cabo para evaluar el desempeño, tanto en modo continuo como en modo medición, del gravímetro Scintrex CG-5 S/N 40484. El análisis de las series de tiempo de gravedad leídas en forma continua durante 35 días permitió investigar la estabilidad del gravímetro, mientras que la determinación de la deriva y la evaluación de la influencia sobre la lectura de factores ambientales (temperatura y presión) colaboraron para examinar los efectos instrumentales y las mínimas variaciones de gravedad que podrían ser detectadas con el mismo. Para valorar las capacidades de este instrumento en modo medición se determinó un gradiente vertical de gravedad y el valor de la fuerza de la gravedad sobre puntos situados en la región de San Juan. Estas mediciones fueron compensadas internamente utilizando el método de mínimos cuadrados. Además, se presentan los resultados de la calibración del gravímetro realizada entre dos estaciones de gravedad absoluta. Especial tratamiento se le da a la corrección por marea terrestre, utilizando para ello modelos más completos y adicionando parámetros locales, con lo cual se consiguió mejorar el umbral de detección del método.

## EL EXPERIMENTO EN MODO CONTINUO

Durante 35 días, entre el 14 de junio y el 19 de julio de 2011, el gravímetro Scintrex Autograv CG-5 (S/N 40484) fue puesto en medición de modo continuo ("cycling mode") en condiciones de gabinete, en dependencias de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, ubicada en el departamento Rivadavia a unos 4 km de la ciudad capital de San Juan (31° 32' 10" S, 68° 30' 15" O). El equipo fue programado para realizar lecturas con las condiciones detalladas en Tabla 1.

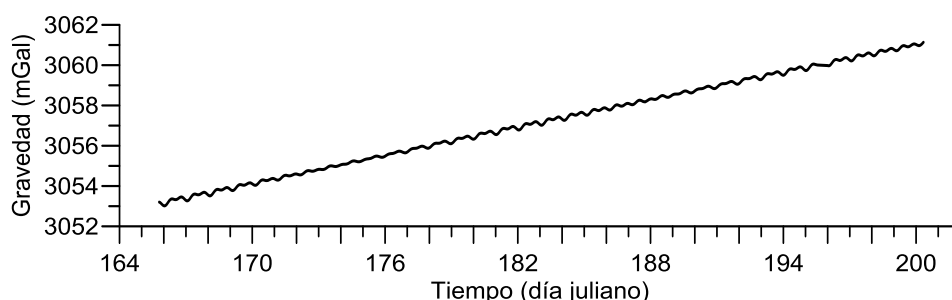
Previamente, se sintonizó la sensibilidad y se ajustaron las correcciones de inclinación de los sensores de inclinación del gravímetro de acuerdo a las recomendaciones de Scintrex Limited (2009).

Puesto que interesaba cuantificar el verdadero drift instrumental de período largo, en el 'setup' del equipo, el parámetro de corrección de drift fue puesto en cero. Además, se desactivó la corrección por marea terrestre. Posteriormente, la serie de lecturas crudas (un total de 30811 muestras) de 35 días fue submuestreada cada 1 hora (figura 1) para facilitar su comparación con los registros meteorológicos de temperatura y presión medidos cada hora en la estación meteorológica oficial más cercana. En esta figura se observa que, superpuestas a las variaciones lunisolares, las lecturas muestran una deriva positiva.

Tiempo de lectura	90	Corrección continua de inclinación	Si
Autoeliminación	Si	Corrección de terreno	No
Filtro sísmico	Si	Corrección por marea terrestre	No
# de ciclos	30811	Grabación de datos crudos	No

**Tabla 1:** Protocolo de programación del gravímetro CG-5 en el modo continuo. Tiempo de lectura: duración en segundos de cada registro (hasta 256); Autoeliminación: automáticamente se elimina el ruido de alta frecuencia (ruido mayor a 6 veces la desviación estándar cuando el filtro sísmico está habilitado); Filtro sísmico: es un filtro de promediado que elimina las bajas frecuencias causadas por ruido sísmico; # de ciclos: número de veces que una lectura es repetida automáticamente; Corrección continua de inclinación: compensa a una velocidad de 6 Hz, variaciones menores en la inclinación vertical en suelo inestable. Cuando no está habilitada la corrección se basa en el último segundo de lectura; Corrección de terreno: corrección de gravedad por efectos de terreno; Corrección por marea terrestre: basada en la fórmula de Longman (1959); Grabación de datos crudos: grabación en memoria de los datos 6 Hz no procesados.

**Table 1:** Programming protocol of the CG-5 gravimeter in continuous mode. Reading time: duration in seconds of each record (up to 256); Auto reject: automatically removes the high frequency noise (noise greater than six times the standard deviation when the seismic filter is enabled); Seismic filter is an averaging filter that removes low frequencies caused by seismic noise; # Cycles: number of times a reading is automatically done; Continuous tilt correction: compensation at a rate of 6 Hz to account for minor variances in vertical tilt during a reading on unstable ground. If this function is disabled a tilt correction based on the last second of the reading is applied; Terrain correction: gravity correction for terrain effects; Tide correction: earth tide correction based on Longman's formula (1959); Save raw data: storage of unprocessed 6 Hz data in memory.



**Figura 1:** Datos de gravedad crudos (sin corrección de drift y marea terrestre aplicadas). Los valores adquiridos con una duración de 90 segundos fueron submuestreados a una velocidad de muestreo de 1 punto por hora, entre el 14/06/2011 y el 19/07/2011.

**Figure 1:** Raw gravity data (with no instrumental drift and earth tide corrections applied). The data acquired with 90 seconds read time were undersampled at a sampling rate of 1 point per hour, between 14/06/2011 and 19/07/2011.

### Corrección por mareas terrestres

Las mareas terrestres son debidas al efecto gravitacional de la Luna y el Sol, combinado con la deformación que inducen sobre la Tierra (e.g., Wahr, 1996). El gravímetro Scintrex CG-5 incorpora en su microprocesador el código de Longman (1959) para predecir la marea terrestre para un modelo de Tierra rígida, y corregir en tiempo real la lectura de gravedad, toda vez que las coordenadas ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ), la hora y fecha de medición son introducidas manualmente o directamente adquiridas por el receptor GPS incorporado en el mismo equipo. La fórmula de Longman adiciona un factor gravimétrico de 1,16 para tener en cuenta la deformación elástica de la Tierra (16 % de amplificación de la deformación de marea gravimétrica de Tierra rígida). En realidad este factor es dependiente de la latitud, de modo que los errores tendrían amplitudes de hasta alrededor de  $\pm 3 \mu\text{Gal}$  (Scintrex Limited, 2009). Por otro lado, esta fórmula no toma en cuenta el efecto de gravedad de las mareas oceánicas (atracción y efecto de carga) que actúan sobre la Tierra sólida subyacente y la deforman. En síntesis, los modelos simples de marea, para una Tierra rígida, no son actualmente aceptables en estudios de microgravedad (Bonvalot et al., 1998; Debeglia y Dupont, 2002).

Por lo tanto se estimó una nueva corrección por mareas con la rutina MT80TW (Royal Observatory of Belgium). Se usó el desarrollo de potencial de marea teórico de Tamura (1987) con 1200 ondas (285 períodos de longitud, 345 diurnas, 377 semi-diurnas, 82 tercios de diurna y 10 cuartos de diurna. La precisión de este desarrollo es mejor que  $0,2 \mu\text{Gal}$  o  $10^{-5}$  de la amplitud de marea (Ducarme, 2006). Como una opción, los parámetros de marea (factores de amplitud y diferencias de fase) locales pueden ser introducidos por el usuario. Para las mareas de gravedad se pueden obtener parámetros más cercanos a la realidad usando el programa WPARICET (Royal Observatory of Belgium). Este algoritmo extrae parámetros de marea para estaciones individuales a partir de mapas mundiales ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ) de parámetros sintéticos de marea de gravedad. El vector carga de marea oceánica

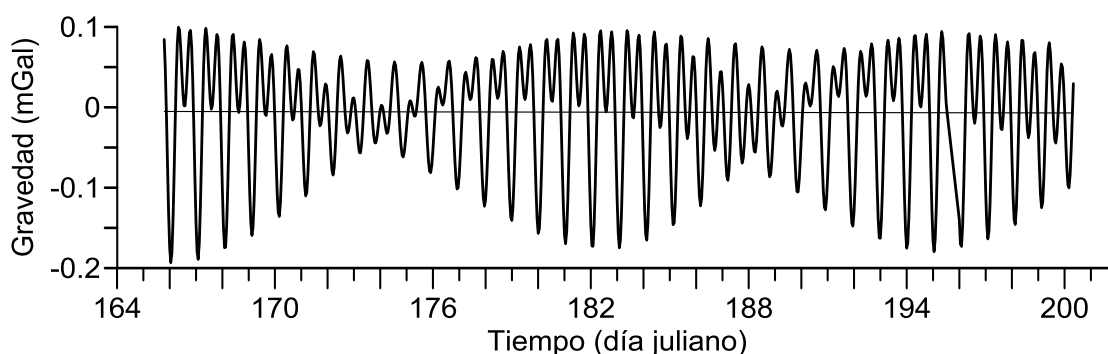
se calcula de acuerdo a la longitud, latitud y elevación de los nodos de la grilla, y luego se adiciona al modelo de marea sólida para proveer los parámetros de marea modelada. El programa ofrece dos enfoques diferentes: para una tierra puramente elástica o para una tierra no elástica. En nuestro caso utilizamos el primero siguiendo a Zhou et al. (2007). La Tabla 2 consigna los parámetros de marea locales estimados para San Juan.

En la figura 2 se muestra la marea predicha para el período 14 de Junio a 19 de Julio de 2011, usando el desarrollo de Tamura (1987) con 1200 ondas. La figura 3 presenta las diferencias entre la marea predicha por el desarrollo de Tamura y el de Longman (1959) durante el período considerado. Puede verse que la predicción usando un modelo preciso produce una mejora de hasta 13  $\mu$ Gal.

Número de Onda	Onda de Grupo	Factor de amplitud	Fase (°)
2- 34	SSA	1,15700	0,0000
35- 281	MF	1,16190	0,0000
282- 424	Q <sub>1</sub>	1,17532	1,1482
425- 530	O <sub>1</sub>	1,17798	1,0768
531- 547	P <sub>1</sub>	1,17866	0,598
548- 586	K <sub>1</sub>	1,16442	0,5541
587- 626	J <sub>1</sub>	1,15600	0,0000
627- 731	OO <sub>1</sub>	1,15600	0,0000
732- 880	N <sub>2</sub>	1,18342	-0,2807
881- 975	M <sub>2</sub>	1,16552	-0,4844
976- 991	S <sub>2</sub>	1,15616	-0,1616
992-1108	K <sub>2</sub>	1,15697	-0,1003
1109-1190	M <sub>3</sub>	1,06630	0,0000
1191-1200	M <sub>4</sub>	1,04000	0,0000

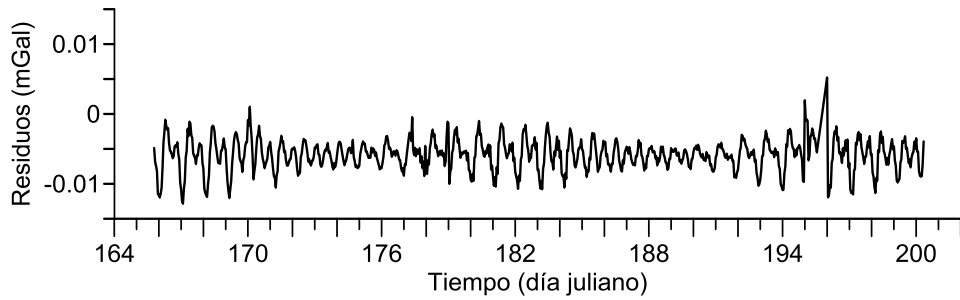
**Tabla 2:** Parámetros locales de marea terrestre para San Juan predichos de acuerdo a la grilla de Zahran et al. (2005) y Zhou et al. (2007). El término de marea permanente  $M_0S_0$  se consideró igual a 1 (fase 0), cumpliendo con la recomendación de la IAG (Asociación Internacional de Geodesia) de marea cero para ser usado en gravimetría (e.g., se remueve la parte astronómica de  $M_0S_0$ ).

**Table 2:** Local parameters of Earth tide for San Juan predicted according to the grid of Zahran et al. (2005) and Zhou et al. (2007). The permanent tide term  $M_0S_0$  was considered equal to 1 (phase 0), complying with the recommendation of the IAG (International Association of Geodesy) of zero tide to be used in gravimetry (e.g., removes the astronomical part of  $M_0S_0$ ).



**Figura 2:** Efecto de marea terrestre predicho por un modelo preciso en San Juan ( $31^{\circ} 32' 10''$  S,  $68^{\circ} 30' 15''$  O) durante 35 días (14-06/19-07-2011). Nótese la envolvente de la frecuencia de modulación del ciclo de 10 días, la frecuencia diaria ( $1 \pm 1 / 10$  ciclos/día), y semidiurna ( $2 \pm 1 / 10$  ciclos/día).

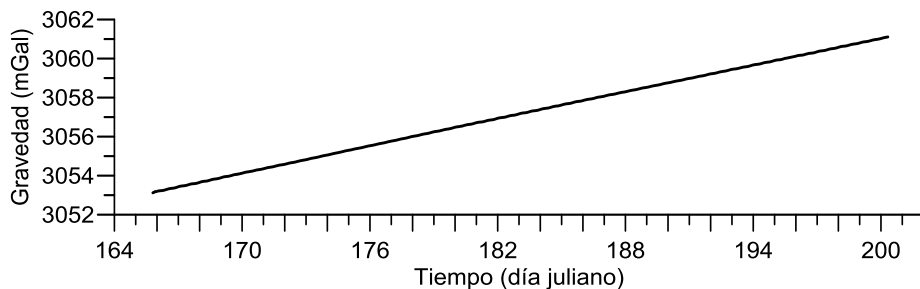
**Figure 2:** Terrestrial tidal effect predicted by a precise model in San Juan ( $31^{\circ} 32' 10''$  S -  $68^{\circ} 30' 15''$  W) during 35 days (14-06/19-07-2011). Note the envelope of the modulation frequency of the 10 day cycle, the daytime frequency ( $1 \pm 1 / 10$  cycles/day), and semi-diurnal ( $2 \pm 1 / 10$  cycles/day).



**Figura 3:** Diferencias entre los modelos teórico de marea de Tamura (1987) y el de Longman (1959) en la ciudad de San Juan, para el período 14 de Junio hasta el 19 de Julio de 2011.  
**Figure 3:** Differences between the theoretical tide models of Tamura (1987) and Longman (1959) in San Juan city, for the period June 14 to July 19, 2011

### Drift instrumental

En la figura 4 se presenta la serie de tiempo de lecturas de gravedad corregidas por marea terrestre usando el modelo preciso de Tamura (1987), pero sin corrección por drift, la cual fue cuantificada mediante dos modelos: 1) lineal, 2) cuadrático. La tabla 3 resume los parámetros determinados para cada modelo.

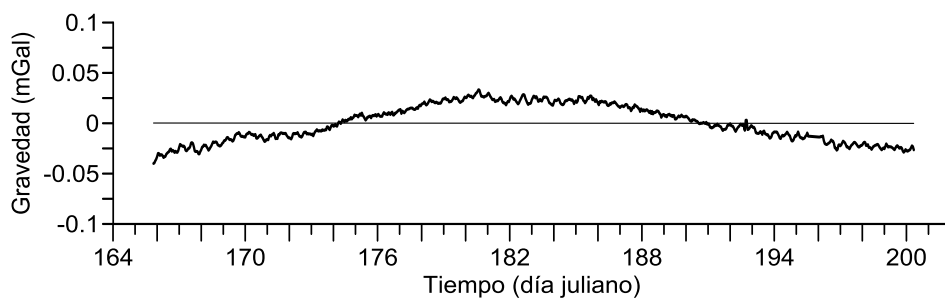


**Figura 4:** Registros de gravedad corregidos por efecto gravitacional de atracción de la luna y el sol para un modelo preciso de marea terrestre, medidos entre el 14 de Junio y el 19 de Julio de 2011 en un punto fijo de la ciudad de San Juan.  
**Figure 4:** Gravity records corrected by the Moon and Sun gravitational attraction effect for a precise model of Earth tide, measured from 14 June to 19 July 2011 at a fix point of San Juan city.

Para el modelo lineal (1), los datos temporales fueron ajustados a una función de la forma:

$$g(t) = M_0 + M_1 t$$

Los coeficientes para este modelo se consignan en Tabla 3. Los residuos entre los valores medidos y el drift lineal (figura 5) varían entre -0,039 y 0,033 mGal (SD= 0,018 mGal). Estos residuos manifiestan claramente que el modelo lineal no es adecuado para representar el drift de período largo de este equipo.

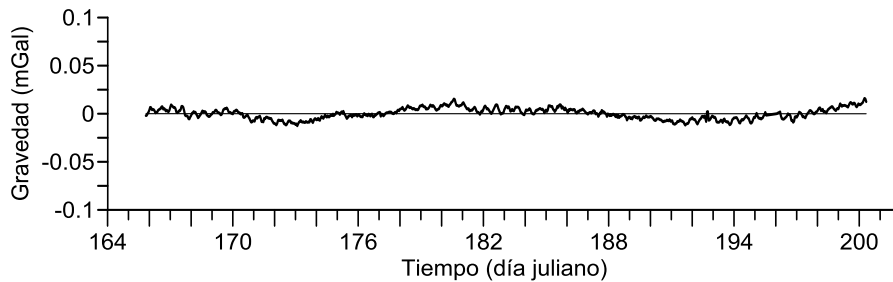


**Figura 5:** Residuos de gravedad luego de remover un drift lineal y un modelo preciso de marea terrestre.  
**Figure 5:** Gravity residues after removing a linear drift and a precise model of Earth tide.

Para el modelo cuadrático (2), las lecturas se aproximaron a una función del tipo:

$$g(t) = M_0 + M_1t + M_2t^2$$

Los coeficientes para este modelo se reportan en Tabla 3, mientras que la figura 6 muestra los residuos. De la comparación de las figura 5 y 6, resulta evidente que el modelo cuadrático es una mejor representación de la deriva de este equipo para largos periodos de tiempo. La amplitud de estos residuos varía entre -0,013 y 0,015 mGal (SD= 0,005 mGal), de modo que pico a pico se han reducido en un 45 %.



**Figura 6:** Residuos de gravedad luego de remover un drift cuadrático y un modelo preciso de marea terrestre.  
**Figure 6:** Gravity residues after the removal of a quadratic drift and an accurate Earth tide model.

	M <sub>0</sub> (mGal)	M <sub>1</sub> (mGal/día)	M <sub>2</sub> (mGal/día <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>
Drift lineal	3014,948	<b>0,230</b>	-	0,999937
Drift cuadrático	3008,430	<b>0,302</b>	-0,000195	0,999994

**Tabla 3:** Parámetros de los modelos de deriva lineal y cuadrática determinados a partir del registro continuo durante 35 días. R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación, el cual indica la mejora en un orden de magnitud para el modelo cuadrático con respecto al lineal.

**Table 3:** Parameters of linear and quadratic drift models determined from the continuous record for 35 days. R<sup>2</sup> is the determination coefficient, which indicates the improvement in one order of magnitude for the quadratic model with respect to the linear.

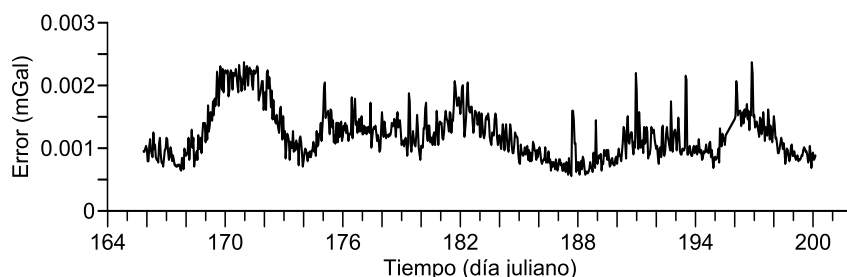
Señalamos que el gravímetro CG-5 #40484 ha tenido un comportamiento estable desde su adquisición en agosto de 2008, sin cambios en el valor de deriva de período corto calculado por el equipo (drift= 0,262 mGal/día), valor este que es aproximadamente el promedio entre los coeficientes de los modelos lineal y el cuadrático para periodos largos aquí determinados.

### Ruido instrumental

La figura 7 revela que superpuesta a la señal de gravedad se registra ruido de alta frecuencia, cuyo error (Err) es de entre 0,0024 y 0,0005 mGal. Para estimar este error se debe tener en cuenta que cada lectura es la media aritmética de una serie de N muestras y la correspondiente desviación estándar SD calculada por el microprocesador del equipo. Los valores individuales con un error mayor que 6 veces la desviación estándar son excluidos en el cálculo de la media (opción AUTO REJECT activada, Seismic Filter activado), y por lo tanto se debe usar en el cálculo, el verdadero número de muestras (DUR) (Sintrex Limited, 2009). Suponiendo que el ruido se distribuye normalmente (Bonvalot et al., 1998) el error en la serie de mediciones se determina de acuerdo a la expresión siguiente:

$$Err = \frac{SD}{\sqrt{DUR}}$$

Bonvalot et al. (1998) señalan que este error representa no sólo la exactitud instrumental de adquisición del sistema sino también el ruido microsísmico que actúa sobre el resorte vertical en varias frecuencias. Para la serie de tiempo analizada 97,5 % de las lecturas no registraron muestras excluidas.



**Figura 7:** Errores estándar obtenidos para la serie de lecturas realizadas entre el 14/06/2011 y el 19/07/2011.  
**Figure 7:** Standard errors obtained for the series of readings made from 14/06/2011 to 19/07/2011.

### Factores atmosféricos

Los residuos en las figuras 5 y 6, obtenidas luego de la corrección por marea terrestre y deriva instrumental, podrían relacionarse a factores geofísicos, instrumentales o atmosféricos. Aspectos instrumentales serían la temperatura interna y la inclinación del sensor; ambas variables son registradas por el equipo. En cuanto a los factores atmosféricos, hemos tenido en cuenta la presión y temperatura ambiente.

La figura 8 presenta los registros de presión atmosférica y temperatura ambiente para el período de tiempo entre el 14 de junio y el 19 de julio de 2011. Estos datos fueron cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional, y corresponden a la Estación Meteorológica sita en el aeropuerto Domingo Faustino Sarmiento, ubicado en la localidad de Las Chacritas, a unos 15 km al sureste de la ciudad de San Juan.

### Temperatura Interna

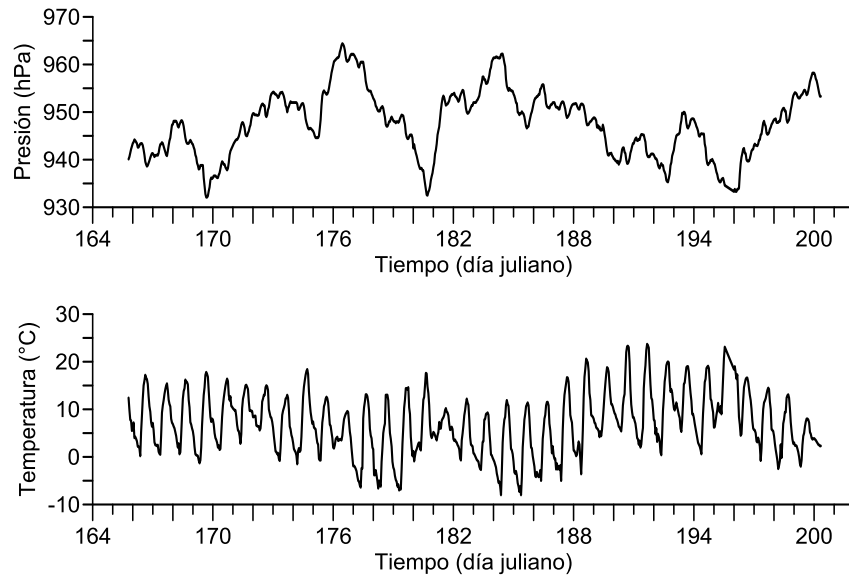
Puesto que las propiedades mecánicas del sistema elástico que forma parte del sensor son afectadas por la temperatura (e.g., idealmente las propiedades elásticas debieran ser invariables con la temperatura), el gravímetro Scintrex CG-5 posee protecciones a los cambios de temperatura ambiente localizando el sistema elástico de cuarzo, el conversor analógico digital, los componentes electrónicos de sensibilidad y los sensores de inclinación en un ambiente controlado por un termostato de alta estabilidad que mantiene la temperatura del resorte constante en un rango de  $0,5^\circ$  mK (Scintrex Limited, 2009). Los cambios de temperatura externa se reducen por un factor por encima de  $1 \times 10^{-5}$  y los efectos residuales son corregidos vía software. En estos gravímetros el rango estándar de termoestabilización es de entre  $-40^\circ$  C y  $45^\circ$  C, y el coeficiente termal del resorte principal es de aproximadamente  $-130$  mGal/ $^\circ$ K. En el caso del instrumento # 40484 el coeficiente de temperatura TEMPCO es  $-0,125$  mGal/mK, según fuera determinado durante la fabricación del instrumento. La temperatura del resorte TEMP es medida en tiempo real mientras se realiza la medición, y registrada en memoria junto con otras variables. El rango de TEMP es  $\pm 500,0$  mK y es ajustada en el rango  $\pm 10$  mK para temperaturas de operación normales. La temperatura de compensación TEC se calcula como sigue (Scintrex Limited, 2009):  $TEC = TEMPCO \times TEMP$

La figura 9 grafica las variaciones internas de temperatura luego de removida una tendencia lineal ( $0,0014$  mK/día), para el período de medición. Estas variaciones se dan entre  $-0,021$  y  $0,022^\circ$  mK, y no presentan correlación alguna con la temperatura ambiente. Por otro lado, se observa (figura 10) correlación de la presión atmosférica (PA) con la temperatura interna (VTEMP), la cual fue calculada mediante regresión lineal ( $R^2 = 0,68$ ):  $VTEMP = -0,0009 \times PA + 0,8383$ . El factor  $-0,0009^\circ$  mK/hPa se usó para remover la correlación entre las dos señales: se encuentran correcciones para la temperatura interna del orden de  $10^{-7}$  mK en promedio, es decir que la corrección es insignificante ( $1-2 \mu$ Gal), demostrando las muy buenas condiciones de aislación del instrumento #40484.

### Respuestas de Inclinación

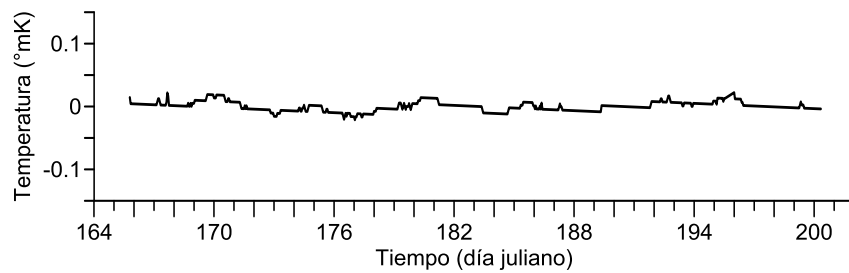
El gravímetro CG-5 posee sensores de inclinación electrónicos con resolución de 1 segundo de arco. Las respuestas de los sensores en las direcciones X e Y son exhibidas en tiempo real en la pantalla del equipo, transmitidas al sistema de adquisición de datos y almacenadas en memoria. Además, el instrumento puede corregir automáticamente los errores de inclinación en un rango de  $\pm 200$  segundos de arco (Scintrex Limited, 2009). Merlet et al. (2008) demostraron experimentalmente y para un gravímetro CG-5 en particular, que la corrección por inclinación que efectúa el equipo electrónicamente, es efectiva al nivel de  $1 \mu$ Gal, que es la resolución nominal del gravímetro, en la medida que las inclinaciones no excedan los  $\pm 20$  segundos de arco.

La figura 11 presenta las respuestas de inclinación registradas durante este experimento. En la misma se puede apreciar que, durante los primeros días del ensayo una inclinación de unos  $-20$  segundos de arco (duración de 1,5 días), seguida por una inclinación de alrededor de  $-12,5$  segundos de arco ( $\sim$ duración de 2,5 días) fue registrada sólo para el eje Y, mientras que en la dirección X la inclinación es de unos pocos segundos de arco. Los errores



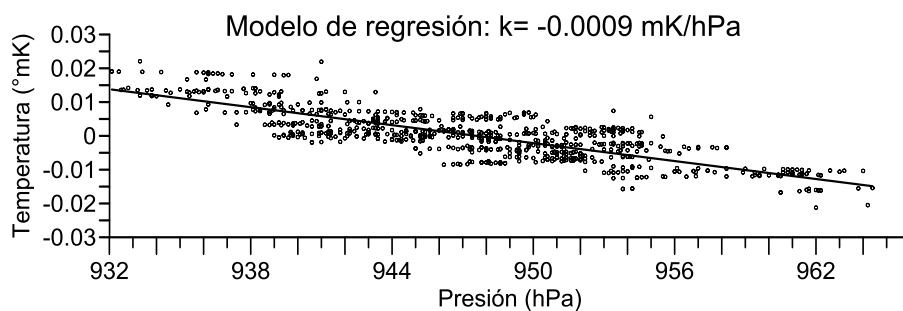
**Figura 8:** Variaciones atmosféricas en el área de San Juan durante el registro continuo de gravedad entre el 14/06 y el 19/07/2011.

**Figure 8:** Atmospheric variations in the San Juan area during continuous registration of gravity between 14/06 and 19/07/2011.



**Figura 9:** Variaciones de temperatura interna registrada en tiempo real por el gravímetro luego de remover una deriva lineal.

**Figure 9:** Variations of the internal temperature registered in real time by the gravimeter after removing a linear drift.

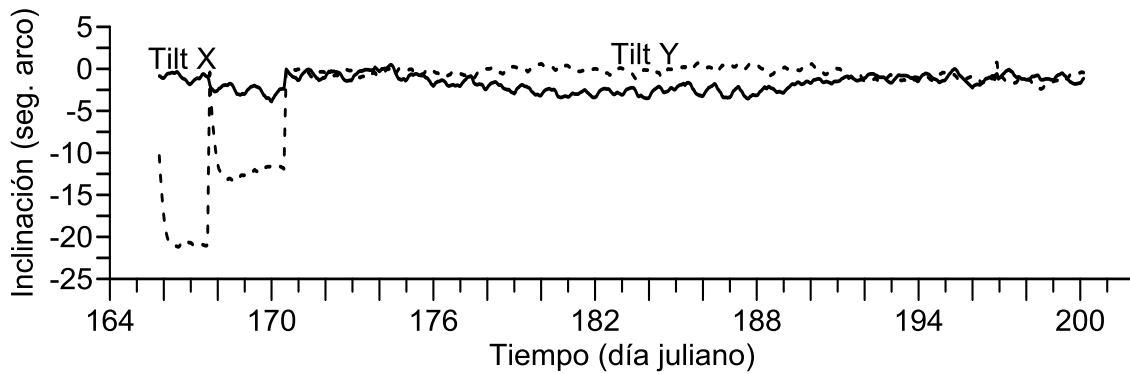


**Figura 10:** Influencia de la presión atmosférica sobre la temperatura interna del gravímetro.

**Figure 10:** Influence of the atmospheric pressure on the internal temperature of the gravimeter.

en las lecturas (véase figura 6) muestran un leve incremento durante ese período. Desconocemos el origen de esta irregularidad, pero basados en el trabajo de Merlet et al. (2008) consideramos que no ha afectado la calidad de este experimento. Las inclinaciones han sido homogéneas durante la mayor parte del experimento: valores menores o iguales a  $\pm 3$  segundos de arco en un 90% y 87 % para las inclinaciones X e Y, respectivamente. No se encontró dependencia lineal o drift en el período largo, ni tampoco se observó correlación con la presión atmosférica o la temperatura ambiente.





**Figura 11:** Variaciones de inclinación en las direcciones X e Y observadas durante el experimento. Nótese el ruido en la dirección Y entre los días 166 a 171.

**Figure 11:** Tilt variations along X and Y directions observed during the experiment. Note the noise in the direction and between 166 to 171 days.

### Presión Atmosférica

Las variaciones en la presión atmosférica ambiental producen cambios temporales de gravedad ya sea por efectos directo o indirecto, con una admitancia de alrededor de  $-0,3 \mu\text{Gal/hPa}$  (e.g., Torge, 1989). El efecto directo es la contribución gravitacional de la carga de masa atmosférica, mientras que el efecto indirecto de dicha masa se relaciona con el desplazamiento vertical del punto atraído, lo cual genera una variación de potencial (potencial de deformación). La amplitud del efecto atmosférico puede alcanzar en períodos cortos unas pocas décimas de  $\mu\text{Gal}$  hasta algunas decenas de  $\mu\text{Gal}$  en el término de varios días (Torge, 1989; Merriam, 1992).

El efecto de gravedad inducido por el peso de la columna de aire se puede expresar como una función lineal de las variaciones de la presión (Torge, 1989):

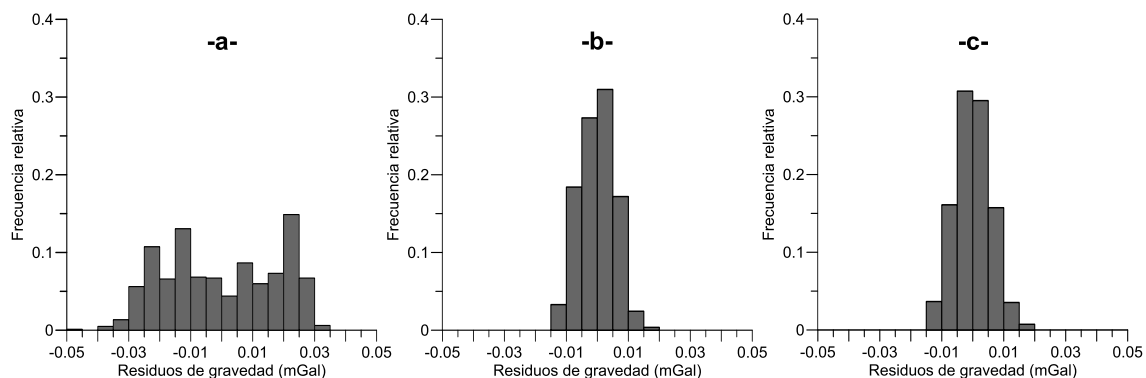
$$PC(t) = C_p [P_Z(t) - P_{Z_0}(t)],$$

$C_p$  es un coeficiente lineal para la corrección por presión y  $P_Z(t)$  y  $P_{Z_0}(t)$  son la presión atmosférica a la altura  $Z$  de la estación y reducida a nivel del mar  $Z_0$ , respectivamente. Esta última ( $P_{Z_0}$ ) se puede calcular aplicando la fórmula siguiente, la cual usa un modelo estándar de atmósfera y la elevación de la estación expresada en metros (e.g., Gabalda et al., 2003):

$$P_{Z_0}[\text{hPa}] = 1013,25 \left( 1 - \frac{0,0065 Z}{288,15} \right)^{5,2559}$$

El coeficiente  $C_p$  puede ser determinado localmente mediante mediciones simultáneas de presión y gravedad. En nuestro caso usamos un valor estándar de  $C_p = 0,3 \mu\text{Gal/hPa}$ , siguiendo lo recomendado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG Resolución No. 9, 1983). Para una altura de la estación  $Z = 643,068 \text{ m}$ ,  $P_{Z_0}$  resulta  $938,344 \text{ hPa}$ . Para las presiones en figura 8, la corrección por variación de la presión atmosférica durante el período de medición varía entre  $-8$  y  $2 \mu\text{Gal}$ . Cuando esta corrección es aplicada a las series de gravedad, los residuos para una deriva cuadrática son de entre  $-0,014$  y  $0,020 \text{ mGal}$ .

La figura 12 presenta los histogramas de los residuos de gravedad para: -a- drift lineal, -b- drift cuadrático, -c- drift cuadrático luego de la corrección por variación atmosférica, mientras que la Tabla 4 resume los estadísticos correspondientes. Estas gráficas demuestran claramente que la deriva estática es mejor modelada por un drift cuadrático en vez de uno lineal. Un 95 % de los residuos para el drift cuadrático quedan comprendidos en el rango de  $\pm 0,01 \text{ mGal}$ , mientras que en ese rango se encuentra el 94 % de los residuos para drift cuadrático luego de la corrección por variación de la presión atmosférica. Señalamos que posiblemente los resultados obtenidos serían mejores si la presión atmosférica se hubiera medido in situ.



**Figura 12:** Histogramas de los residuos de gravedad luego del ajuste de la serie de lecturas durante el experimento para: -a- drift lineal, -b- drift cuadrático, -c- drift cuadrático para las lecturas corregidas por variaciones de presión.

**Figure 12:** Histograms of the residues of gravity after the setting of the series of readings during the experiment for: -a- linear drift, -b- quadratic drift, -c- quadratic drift for readings corrected by pressure variations.

	Drift lineal	Drift cuadrático	Corrección por presión / Drift cuadrático
SD	0,0181	0,0056	0,0057
Máximo	0,0331	0,0152	0,0198
Mínimo	-0,0399	-0,0127	-0,0145

**Tabla 4:** Valores estadísticos principales de los residuos de gravedad luego del ajuste de la serie de lecturas durante el experimento para: drift lineal, drift cuadrático, drift cuadrático para las lecturas corregidas por variaciones de presión. SD: desviación estándar.

**Table 4:** Main statistics of residues of gravity after the setting of the series of readings during the experiment for: linear drift, drift quadratic, quadratic drift for readings corrected by pressure variations. SD: standard deviation.

## MEDICIONES EN MODO RELEVAMIENTO

### Calibración

El diseño del gravímetro Scintrex está basado en un sistema elástico lineal, de modo que el factor de calibración es válido para todo el rango de medición, siendo suficiente para ello la realización de lecturas en al menos 2 puntos con gravedad conocida con gran precisión. En nuestro caso se usaron los puntos ubicados en las provincias de San Juan (31,54545° S, 68,68426° O) y Salta (24,72119° S, 65,50466° O), que forman parte de la Red Fundamental de Gravedad de Orden Cero de Argentina. La diferencia de aceleración de la gravedad entre estas dos bases (San Juan, Salta) es de  $\sim 732,239 \text{ mGal} \pm 0,01 \text{ mGal}$  (Torge et al., 1994), con diferencia en latitud de  $\sim 6,8^\circ$  y  $\sim 800 \text{ m}$  en altura. Se realizaron calibraciones antes y después de las mediciones de la red de gravedad regional en San Juan (véase en apartado correspondiente más abajo). El tiempo de lectura fue 120 segundos en cada estación, con determinaciones de gravedad en un esquema ABBA. Dada la distancia entre ambos sitios, las mediciones fueron realizadas en un lapso de 48 horas. Se aplicaron correcciones precisas por marea lunisolar tal como se describió en párrafos previos, y posteriormente los datos fueron procesados usando el algoritmo GRADJ, cuyas características se detallan más abajo. La Tabla 5 presenta los factores de escala lineales encontrados y sus errores. El gravímetro resulta estable dentro de  $1 \times 10^{-4}$ , o bien de  $0,6 \mu\text{Gal}$  en la medición de  $10 \text{ mGal}$ .

El factor de calibración determinado puede ser introducido manualmente en el protocolo de parámetros del equipo, o bien corregido externamente durante el procesamiento.

### Gradiente Vertical de Gravedad

Se determinó el gradiente de gravedad vertical local en la estación de gravedad absoluta (Torge et al., 1994) ubicado en el Instituto Geofísico Sismológico Volponi (FCEFN-Universidad Nacional de San Juan). El protocolo de medición de CG-5 consistió en: tiempo de lectura 80 segundos, ciclo de lectura de 25 minutos, midiendo a dos alturas:  $H_1 = 0,175 \text{ m}$  (a nivel de terreno) y  $H_2 = 1,415 \text{ m}$  (sobre un tripode, figura 13). Un tercer punto auxiliar (sobre el pilar adyacente) fue medido antes y después de los otros registros para control de deriva. Los valores de gravedad fueron corregidos usando un modelo preciso de marea terrestre (véase el apartado correspondiente) y

luego procesados mediante el programa GRADJ (Forsberg, 1981), el cual efectúa un ajuste de las observaciones de gravedad relativa utilizando el método de mínimos cuadrados. Los fundamentos del algoritmo GRADJ se resumen en el apartado que sigue. El gradiente vertical medido resultó:  $\partial g_z / \partial H = -0,194 \pm 0,001$  mGal/m. Este valor es consistente con el gradiente determinado por Torge et al. (1994) de  $-0,192$  mGal/m para el mismo sitio.

	Factor de Escala	Error
Calibración Antes	0,999619	0,000038
Calibración Después	0,999653	0,000096

**Tabla 5:** Factores de escala y sus errores obtenidos durante las calibraciones del gravímetro CG-5 # 40484, realizadas en el término de dos meses.

**Table 5:** Scaling factors and their errors obtained during the calibrations of the gravimeter CG-5 # 40484, made in the term of two months.



**Figura 13:** Medición del gradiente vertical de gravedad en el sitio de gravedad absoluta ubicado en el Instituto Geofísico Sismológico Fernando Volponi (Universidad Nacional de San Juan).

**Figure 13:** Measurement of the vertical gradient of gravity at the absolute gravity site in the Geophysical Seismological Institute Fernando Volponi (National University of San Juan).

### Mediciones de gravedad en circuitos

Se midió gravedad en 6 puntos distribuidos en el área de la provincia de San Juan (figura 14). Durante las lecturas se siguió un esquema de circuitos (ABCDECA, figura 15), usando un ciclo de lectura de 120 segundos, con un punto de control de deriva dinámica medido en el lapso de 24 horas.

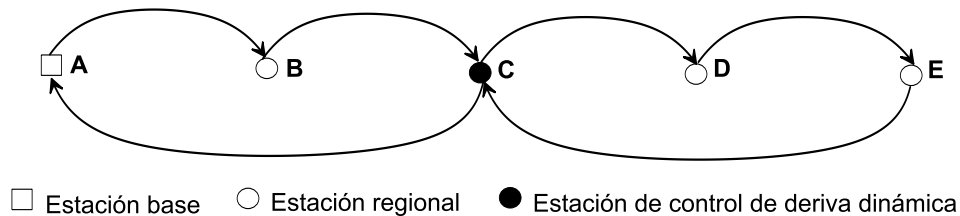
Los valores de gravedad fueron corregidos por un modelo preciso de marea (véanse párrafos previos).

### Cálculo y compensación

El gravímetro Scintrex remueve automáticamente la deriva estática supuesta como lineal, determinada previamente en condiciones de gabinete. Sin embargo, durante la medición se pueden producir una variedad de errores accidentales de difícil modelado tales como: cambios ocasionales en el voltaje de alimentación, variaciones de temperatura y presión que no son compensados por los controladores del gravímetro, debido a efectos de transporte, microsismicidad, entre otros. En el proceso de la compensación pueden eliminarse y/o ajustarse estos errores utilizando, por ejemplo, el método de mínimos cuadrados para una red vinculada (e.g., Hwang et al. 2002).



**Figura 14:** Ubicación de las estaciones de medición de gravedad en la Provincia de San Juan.  
**Figure 14:** Location of the recording gravity stations in the San Juan Province.



**Figura 15:** Método de observación en circuitos (ABCDECA) usado para las lecturas de gravedad sobre la red de gravedad regional de la provincia de San Juan.  
**Figure 15:** Method of observation in circuits (ABCDECA) used for the gravity readings on the regional gravity network of the San Juan Province.

Para la compensación de la red se utilizó el programa GRADJ del paquete GRAVSOFT desarrollado por René Forsberg (Danish National Space Center). El código fuente de este programa está escrito en lenguaje FORTRAN 77. Las lecturas de gravedad reducidas (corregidas por marea lunisolar) se introducen en el modelo funcional como lecturas independientes. La ventaja de usar las lecturas reducidas, en vez de las diferencias entre sucesivas de lecturas de gravedad, es que las observaciones se pueden asumir como no correlacionadas (Schüler, 1999). GRADJ ajusta las estaciones con datos redundantes, mientras que las que cuentan con sólo un valor, son calculadas pero no ajustadas (N/A en Tabla V). El sistema de ecuaciones de todas las observaciones efectuadas se puede expresar en forma matricial como:

$$Ax = b - r,$$

donde  $x$  es el vector de parámetros incógnita,  $A$  es la matriz de coeficientes conocidos,  $b$  es el vector de observaciones y  $r$  el vector de residuos.

La resolución es por el método de mínimos cuadrados para obtener la estimación óptima no sesgada de  $x$ :

$$x = (A^T W_b A)^{-1} A^T W_b b$$

$W_b$  es la matriz de peso de  $b$ . Las estimaciones del error esperado para los parámetros ajustados son obtenidas a partir de la matriz de (co)varianza de  $x$ :

$$\sum_x^2 = \sigma^2 (A^T W_b A)^{-1},$$

$W_b$  es una matriz diagonal (y por defecto identidad) en el ajuste. Los elementos de la diagonal de  $W_b$  pueden representar los pesos de un día de observación, el peso de un gravímetro (si se usan varios gravímetros simultáneamente) o incluso una sola lectura.

Los cálculos incluyeron los pasos siguientes: primero se analizaron las funciones de deriva dinámica y taras; eventualmente en esta etapa se puede remover lecturas atípicas (“outliers”). Luego, el algoritmo de compensación automáticamente estimó los valores de peso a partir de la desviación estándar de las lecturas mediante el ajuste del conjunto de datos, todo ello en un esquema iterativo. Durante el proceso se debieron tomar decisiones acerca del tiempo máximo permitido entre mediciones o si se limita el valor de deriva instrumental, por lo cual se hicieron varias corridas de prueba. El punto tomado como fijo en la compensación fue el denominado como 1 (figura 14), que cuenta con gravedad absoluta (Torge et al., 1994). Los valores de aceleración de gravedad ajustados (Tabla 6) exhibieron desviaciones estándar de entre 10 y 14  $\mu\text{Gal}$  ( $\sigma_{\text{apriori}} = 16 \mu\text{Gal}$ ).

Punto Fijo	Gravedad (mGal)	SD (mGal)	Localidad
1	979141,649	0,010	Rivadavia
8	979166,828	0,012	San Juan
9	978929,904	N/A	Jáchal
10	978746,218	N/A	Rodeo
11	978938,343	N/A	Calingasta
12	979259,700	0,014	Marayes
13	979156,599	N/A	Valle Fértil

**Tabla 6:** Valores de gravedad ajustados y sus desvíos estándar (SD). N/A: valores no ajustados por contar con sólo una lectura de gravedad. La figura 14 muestra la ubicación de las estaciones de gravedad.

**Table 6:** Adjusted gravity values and their standard deviations (SD). N/A: values not adjusted by having only one reading of gravity. Figure 14 shows the location of the gravity stations.

Debemos señalar que mayores precisiones hubieran sido posibles i) aumentando el tiempo de lectura (por ejemplo: tiempo de observación de 20-30 minutos), ii) con un mayor control de la deriva de transporte (e.g., estableciendo una base de repetición para el modelado de la deriva, iii) midiendo con al menos dos gravímetros en paralelo para minimizar los errores sistemáticos de los instrumentos.

## CONCLUSIONES

- 1- La corrección por marea usando un modelo preciso (e.g., el desarrollo de Tamura (1987) o el Cartwright & Taylor (1971), de 1200 ó 505 componentes, respectivamente, usando parámetros locales derivados de grillas mundiales, produce una mejora de entre -0,013 y 0,005 mGal, con respecto a la predicción usando el algoritmo de Longman (1959).
- 2- No se observa correlación entre las variaciones de gravedad y la temperatura interna (o externa) del gravímetro.
- 3- Existe correlación entre la temperatura interna del instrumento y la presión atmosférica. Sin embargo, los niveles de influencia de esta corrección están en el rango de exactitud del equipo.
- 4- La corrección por variación de presión atmosférica toma valores de entre -8 y 2  $\mu\text{Gal}$ . Es conveniente realizar mediciones simultáneas de gravedad y presión atmosférica para obtener mejores resultados.
- 5- El drift en el modo continuo es mejor representado por una función cuadrática, el cual reduce los efectos de otros factores (e.g., presión atmosférica sobre temperatura interna). Los residuos de gravedad se mantienen en un 95 % en 10  $\mu\text{Gal}$  o inferior.
- 6- La calibración del gravímetro permitió determinar un factor de escala lineal con errores del orden de  $10^{-4}$ . Las calibraciones antes y después de las mediciones muestran una variación inferior al 0,0034%, demostrando la estabilidad de este instrumento durante el período evaluado.
- 7- El gradiente vertical local determinado es de  $-0,194 \pm 0,001 \text{ mGal/m}$ , siendo consistente con mediciones previas (diferencia de 2  $\mu\text{Gal}$ ).
- 8- Las mediciones de gravedad siguiendo un esquema de circuitos, en puntos fijos de la red de gravedad de San Juan exhiben errores internos menores a 14  $\mu\text{Gal}$  luego del ajuste por mínimos cuadrados.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Universidad Nacional de San Juan por el subsidio (PIC 21E/900) que permitió el desarrollo de la presente investigación. También se agradece a los árbitros que contribuyeron a una mejor comprensión del contenido del trabajo.

## REFERENCIAS

- Bonvalot, S., M. Diament and G. Gabalda, 1998. Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophys. Jour. Int.*, v. 135 (2), 470-494.
- Debeglia, N. and F. Dupont, 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Jour. Appl. Geophys.*, 50, 435-454.
- Ducarme, B., 2006. Comparison of some tidal prediction programs and accuracy assessment of tidal gravity predictions. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 141, 11175-11184.
- Forsberg, R., 1981. Establishment of a LaCoste&Romberg Gravity Network in Greenland. Bureau Gravimetrique International, *Bull. Inf.*, 49, 168-179.
- Gabalda, G., S. Bonvalot and R. Hipkin, 2003. CG3TOOL: an interactive computer program to process Scintrex CG3/3M gravity data for high-resolution applications. *Comp. & Geosci.* 29 (2), 155-171.
- Hwang, C., C. G. Wang and L. H. Lee, 2002. Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, *Comp. Geosci.*, 28 (9), 1005-1015.
- Longman, I. M., 1959. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and Sun. *Jour. Geophys. Res.*, 64 (12), 2351-2355.
- Merlet, S., A. Kopaev, M. Diament, G. Geneves, A. Landragin and F. P. Dos Santos, 2008. Micro-gravity investigations for the LNE watt balance project. *Metrologia* 45 (3), 265-274.
- Merriam, J. B., 1992. Atmospheric pressure and gravity. *Geophys. Jour. Int.*, 109, 488-500.
- Riccardi, U., G. Berrino, G. Corrado and J. Hinderer, 2008. Strategies in the processing and analysis of continuous gravity record in active volcanic areas: the case of Mt. Vesuvius. *Annals of Geophysics*, 51(1), 67-85.
- Scintrex Limited, 2009. CG5 Scintrex autograv system Operation Manual, Scintrex Limited, Concord, Ont., Canada, pp 311.
- Schüler, T., 1999. Introduction to Gravimetry: Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. A brief tutorial. Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, 15 pp.
- Tamura, Y., 1987. A harmonic development of the tide-generating potential. *Bull. Inf; Marées Terrestres*, 99, 6813-6855.
- Torge, W., 1989. *Gravimetry*: Walter de Gruyter Publishing Co., pp 465.
- Torge W., L. Timmen, R. H. Röder and M. Schnull, 1994. The IFE Absolute Gravity Program "South America" 1988-1991. Deutsche Geodatische Kommission, pp. 44.
- Wahr, J., 1996. *Geodesy and Gravity*. Class Notes. Samizdat Press, pp 294.
- Zahran, K.H., G. Jentzsch and G. Seeber, 2005. World-wide synthetic tide parameters for gravity and vertical and horizontal displacements. *Jour. Geod.*, 79, 293-299
- Zhou J., H. Sun and B. Ducarme, 2007. Validating the synthetic tidal gravity parameters with superconducting gravimeter observations. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 143, 11489-11497.

Recibido: 6-12-2012

Aceptado: 22-2-2013