

Extensión de la red gravimétrica en el noroeste argentino

María Inés Pastorino*
Sebastián Gutiérrez*
Juan C. H. Jiménez Santillán*

Abstract

The goal of this paper is to continue with the task of establishing new base stations in the northwestern portion of the Republic of Argentina, building on those already existing in the Argentinean Gravimetric Network and the densification of gravimetric observations in zones which have none.

The new base stations are in response to the need to afterwards connect our network with the Chilean Network in the north of both countries: Paso de San Francisco and Paso de Jama. It is also being done to conduct surveys connected to the base stations for prospection studies in the northwestern portion of the Andes mountain range, between the aforementioned countries.

The task was divided into two stages. In the first, the value of the gravimetric station located at the San Francisco Church (Excenter of Absolute Gravimetry, refer to Monograph 1) was transferred to Node 219 (refer to Monograph 2), of the National Leveling Network located in Perico, Jujuy. In the second stage the value established in the Node was transferred to the Susques, Jujuy community on the monument recently implemented by the National Geographic Institute (IGN in Spanish, refer to Monography). Two additional stations were left as intermediate points with the same precision (refer to Monographies); one at the crossroad of national routes Ex40 and 52 and the other at the astronomical point of YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales) in Susques.

During the campaign, measurements were taken with two Lacoste-Romberg gravimeters (models G-13 and G-57) and a GPS Garmin ETREX satellite positioner.

Key words: *Gravimetric network, base stations, connections, absolute stations.*

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo continuar con la tarea de establecer nuevas estaciones bases en el noroeste de la República Argentina, a partir de las ya exis-

- Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA), Departamento de Geodesia y Topografía, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel Tucumán, República Argentina, correo electrónico: maines@unt.edu.ar

tentes en la Red Gravimétrica Argentina y con la densificación de observaciones gravimétricas, en zonas carentes de ellas.

Estas nuevas estaciones bases responden a la necesidad de vincular, posteriormente, nuestra red con la Red Chilena en el Norte de ambos países: Paso de San Francisco y Paso de Jama, como así también, poder realizar levantamientos, conectados con las estaciones bases, para estudios de prospección en la zona noroeste de la Cordillera de los Andes, entre los pasos nombrados.

La presente tarea fue dividida en dos etapas, en la primera se trasladó el valor de la estación gravimétrica, ubicada en la Iglesia de San Francisco (Estación Excentro de la Gravimétrica Absoluta de San Lorenzo, véase Monografía 1), Salta hasta el Nodal 219 (véase Monografía 2), de la Red de Nivelación Nacional, ubicado en Perico, Jujuy. En la segunda etapa, se traslada el valor establecido en el Nodal hasta la población Susques, Jujuy, sobre la monumentación recientemente implementada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN, véase Monografía), quedando como puntos intermedios y con la misma precisión dos estaciones más (véase Monografías), una, en el cruce de las rutas nacionales Ex40 y 52, y la otra en el punto astronómico de YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales) en Susques.

En dicha campaña se llevaron a cabo mediciones con dos gravímetros Lacoste-Romberg (modelos G-13 y G-57) y un posicionador satelital GPS Garmin ETREX.

Palabras claves: *red gravimétrica, estaciones bases, vinculaciones, estaciones absolutas.*

Introducción

Para dar continuidad a los objetivos planteados en el proyecto “Levantamiento, procesamiento e interpretación de datos gravimétricos”, aprobado y financiado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán (CIUNT), bajo la dirección de Pastorino, se llevó a cabo la Campaña Gravimétrica en el Noroeste de Argentina, entre la Capital de Salta y la población de Susques (Jujuy).

Como punto de partida se escogió la estación base ubicada en la Iglesia San Francisco, de la ciudad de Salta, excentro de la estación gravimétrica absoluta San Lorenzo (Salta), trasladando este valor a Perico para luego establecer una base en Susques. Esta última permitirá en una futura campaña concretar una vinculación internacional con Chile en lo referente a las redes nacionales de gravedad de dicho país con el nuestro y por otro lado permitirnos la implementación de campañas de densificación gravimétrica en esta zona del Noroeste Argentino (NOA), que tiene una gran carencia de mediciones Gravimétricas.

Recordemos que, la estación excentro tiene valor de gravedad con el mismo nivel de precisión que la base gravimétrica a la cual está referida, en este caso, a la

estación absoluta de San Lorenzo, Salta. Característica que pudimos asignarle en esta campaña al resto de las 5 estaciones bases determinadas.

La campaña de mediciones se llevó a cabo sobre un total de cinco estaciones bases de gravedad, todas en la provincia de Jujuy, y sobre las rutas nacionales (9 y 52), que se dirigen al paso de Jama, teniendo la precaución de establecer una estación base en el cruce de las rutas nacionales Ex 40 y 52, con el objetivo de poder llevar a cabo posteriormente levantamientos hacia otras zonas desprovistas de valores, como por ejemplo la comprendida entre los paralelos 23°S – 26°S, desde la Cordillera hasta el meridiano de 66°W.

El área de estudio puede apreciarse en el mapa (Figura 1), esta comprendida entre los paralelos 23° 30'S y 24° 50'S y 65° 10'W y 66° 30'W, aproximadamente.

Las mediciones pertinentes se realizaron del 8 al 12 de setiembre del 2010, recorriendo un total de 3400 kilómetros, llevándose a cabo las mediciones con dos gravímetros Lacoste-Romberg, G-13 y G-57 y un posicionador satelital Garmin Etrex.

En todo momento se procuró cuidar la precisión propuesta para las cinco estaciones bases, según el modelo de medición bajo la secuencia ABCDEEDCBA (1 loop o 1 vuelta), la utilización de dos gravímetros y realizando el cálculo de optimización mediante una matriz de Varianza-Covarianza, nos permitió asegurar que las observaciones realizadas bajo las condiciones del citado modelo, nos brindarán resultados con una precisión de $\sigma = 0.01$ mgal, una vez compensados sus valores. De esta forma las rutinas establecidas nos aseguran homogeneidad tanto en los levantamientos como en el posterior cálculo. Cuidando en la ejecución de las observaciones, llevar a cabo los “loops” o vueltas de mediciones necesarias que nos permitan alcanzar la precisión deseada, en lo que se refiere a valores para una red gravimétrica.

Levantamiento gravimétrico

Salta Perico

En primer lugar se llevó a cabo el traslado de la estación excentro, ubicada en la vereda de la Iglesia San Francisco (1187m) de la ciudad de Salta (véase monografía 1), al Nodal 291 (942m), ubicado en la Plaza de Perico, Jujuy, debidamente monumentado, razón por la cual se eligió el Nodal como estación base, ya que está ubicado a 4.2 kilómetros de la estación perteneciente a la base de calibración de la República Argentina (BA.CA.RA., 1965), que se encontraba en el aeropuerto de Jujuy en Perico y que fuera destruido al realizar las reformas edilicias en dicho aeropuerto. El Nodal como todas las estaciones elegidas, cumplen con las condi-

ciones de “accesibilidad, estabilidad, permanencia, lugar público”, debido a su cimentación de concreto y que además son puntos altimétricos de primera categoría.

Las mediciones gravimétricas llevadas a cabo fueron realizadas según lo diseñado para preservar una precisión uniforme en todas las estaciones, como así también, los gravímetros fueron transportados en un vehículo utilitario, sobre los asientos traseros, perfectamente amarrados para evitar vibración mecánica y cualquier cambio brusco de temperatura. Se trató siempre de mantener en el vehículo temperatura similar a la de las estaciones a medir, mediante una adecuada apertura de las ventanillas, procurando de esta forma eliminar posibles errores ajenos a las lecturas. Todas las observaciones fueron ejecutadas con los gravímetros colocados sobre sus bases nivelantes de aluminio. Los tiempos para realizar estas “lecturas finas” después de la primera lectura, inmediatas al *unclamping*, estuvieron dentro de los dos minutos como lo aconseja Klingelé, E. Se realizaron 4 vueltas o loops, habiéndose recorrido 700 kilómetros.



Figura 1. Mapa del Noroeste de Argentina: zona de estudio.

Perico-Susques

En esta segunda etapa se partió del Nodal 219 de Perico con la idea de llevar valor gravimétrico hasta Susques, como el lugar más cercano a la frontera con Chile, Paso de Jama (126 kilómetros) y centro para próximas campañas regionales. En esta etapa se recorrieron 2000 kilómetros.

En cuanto al levantamiento de las observaciones, se tuvieron los mismos cuidados que en la etapa anterior, tanto en el traslado del instrumental como en las lecturas.

Siempre con la idea de disponer de estaciones bases que nos permitan ir ampliando la red en zonas carentes de observaciones, como lo es, la zona de la Puna Jujeña, se establecieron bases estratégicas intermedias: en el Cristo a la entrada de la población de Palpalá (1140m), en la Iglesia de Purmamarca (2300m) y en especial, la estación ubicada en el cruce de las Rutas Nacionales Ex 40 y 52 (3450m). Esta última, nos permitirá a partir de ella, densificar la zona entre la Cordillera y el meridiano de 64° W, incluyendo el Paso Socompa.

En Susques se establecieron dos estaciones bases sobre puntos de notoriedad como lo son, el Punto Astronómico de YPF (3567m) y el recientemente instalado, punto de la red de nivelación (3596m), del Instituto Geográfico Nacional.

Una vez concluido el trabajo de campo de las 2 etapas y efectuada la carga de los datos se llevó a cabo el procesamiento mediante nuestro software, SI-GEO (Sistema Integral para el Procesamiento de Datos Geofísicos) en las instalaciones de Laboratorio de Geofísica Aplicada y Ambiental (LAGAMA), de la Universidad Nacional de Tucumán.

Modelo compensación

Para el procesamiento se utilizó software SI-GEO, mediante el cual, las observaciones fueron corregidas, tanto en lo que respecta a la transformación de las lecturas a miligales, según las tablas correspondientes a cada gravímetro utilizado en la campaña, como así también del efecto de atracción lunisolar y deriva. Se procedió luego al cálculo de compensación por mínimos cuadrados de la Red, cuyo modelo está definido por:

$$g_i - g_j = k_{1\ell}(R_i - R_j) + k_{2\ell}(R_i^2 - R_j^2) + d_\ell(T_i - T_j) + v_{ij} \quad (1)$$

donde:

g_i, g_j son los parámetros que representan valores de gravedad en dos estaciones i y j , sucesivamente observadas

- $k1l$ es el parámetro para la constante de calibración de primer orden para el gravímetro λ
- $k2l$ es el parámetro para la constante de calibración de segundo orden para el gravímetro λ
- Ri y Rj son las lecturas del gravímetro con el instrumento λ en las estaciones i y j corregidas respectivamente por las tablas de calibración del dial, mareas terrestres y posiblemente otros factores relacionados con la posición del punto
- dl es el parámetro de deriva para el intervalo de deriva λ , determinado por el usuario de acuerdo al número de gravímetros
- Ti y Tj son las lecturas de tiempo en las estaciones i y j
- vij es el error de observación.

Resultados

Los valores de gravedad compensados y sus respectivas desviaciones están expresados en unidades de miligal. Además se puede observar todas las estaciones están por debajo del $\sigma = 0.01$ mgal, excepto el valor de la Iglesia de Purmamarca que nos da algo mayor que el σ propuesto (Tabla 1).

Tabla 1
Valores de Gravedad Compensados en las Estaciones Bases medidas con sus respectivas Desviaciones Estándares y coordenadas Planialtimétricas

<i>Estaciones bases</i>	<i>Valor gravedad [mgal]</i>	<i>σ [mgal]</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altura [m]</i>
Nodal 219 - Perico	978563.370	0.009	24 22 33.1	65 07 05.5	974.64
Iglesia Purmamarca	978141.152	0.015	23 44 49.8	65 29 57.1	2295.02
Gruta RP 79 y RN 52	977861.047	0.005	23 38 38.4	65 50 23.7	3363.74
Pto. Astronómico YPF	977797.651	0.002	23 23 52.0	66 22 02.6	3567.20
Pto. Fijo IGN Plaza	977799.289	0.001	23 23 57.1	66 21 56.3	3596.25

Se adjuntan las monografías de las estaciones bases implementadas permitiéndonos conocer la ubicación y descripción de cada estación.

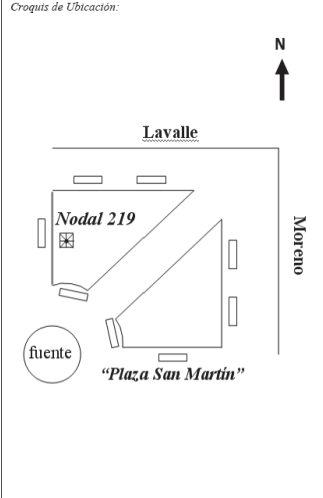
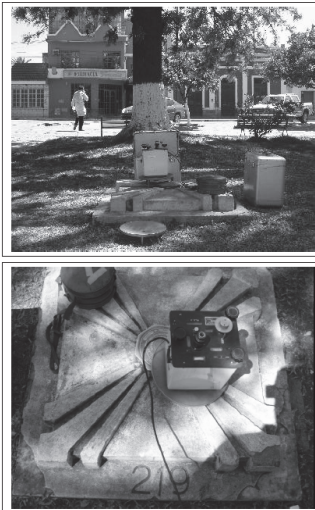
En las campañas trabajaron Raúl S Gutiérrez (recientemente recibido de Ingeniero Geodesta y Geofísico) y Rubén E. Sánchez (estudiante) ambos pasantes en formación dentro del Proyecto de Investigación del CIUNT, que dirige Pastorino.

Conclusiones

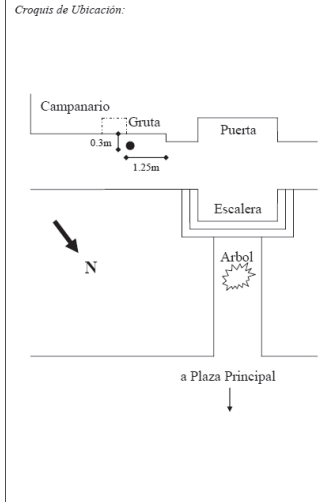

Con el establecimiento de estas nuevas estaciones damos la posibilidad a dar continuidad de diversos proyectos de índoles geodésicos, geodinámicos, geofísicos y geológicos, entre otros, aportando de este modo una gran gama de aplicaciones útiles a la investigación como así también a la comunidad en general. En primer lugar, podremos cumplir con nuestros objetivos inmediatos como lo son, la vinculación entre las Redes Gravimétricas de Argentina y Chile al Norte, la densificación de puntos gravimétricos para prospección en el Noroeste Argentino y realizar levantamientos para el estudio de la estructura de los Andes en la zona Norte entre los 22°S-32°S, como así también, la determinación de alturas ortométricas que, combinadas con alturas elipsoidales nos permitirán obtener una buena estimación del geoides; estudios de anomalías de la gravedad con respecto a un patrón normal en el terreno y su interpretación geofísica, permitiéndonos llevar a cabo el estudio de la distribución y composición de las masas en superficie. Se puede deducir también una interpretación de procesos tectónicos, investigación de terremotos (sismología y vulcanología), así como de la isostasia terrestre.

<p><i>Pais:</i> ARGENTINA</p>	<p><i>Nombre de Estación:</i> IGLESIA SAN FRANCISCO</p>	<p><i>Número de Estación:</i> AR-203</p>
<p><i>Provincia:</i> Salta <i>Localidad:</i> Salta <i>Latitud:</i> 24° 47' 23" S <i>Longitud:</i> 65° 24' 33" W <i>Altura:</i> 1187.00 m.s.n.m. <i>Fecha:</i> Noviembre 1999</p>	<p><i>Croquis de Ubicación:</i></p>	
<p><i>Descripción:</i> La estación de gravedad se encuentra en la intersección de las calles Caseros y Córdoba, en la esquina de la iglesia San Francisco, en la ciudad de Salta. El punto se ubica sobre la vereda de la calle Córdoba y a nivel del suelo.</p> <p><i>Description:</i> The gravity station is located on Caseros and Córdoba streets intersection, in the corner of San Francisco church, in Salta city. The point is on Córdoba street sidewalk and at ground level.</p>		

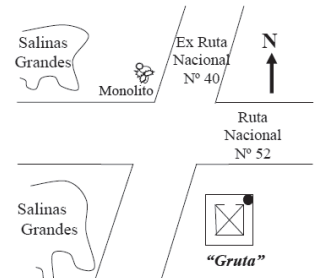
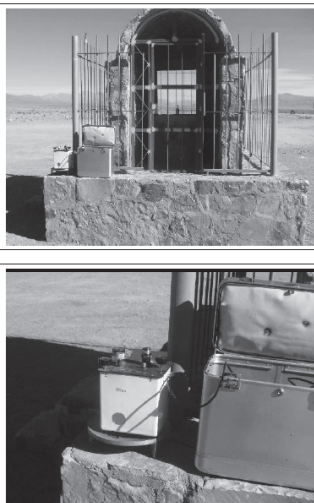
Monografía 1.

<p><i>País:</i> ARGENTINA</p>	<p><i>Nombre de Estación:</i> NODAL 219 - PERICO</p>	<p><i>Número de Estación:</i> AR-204</p>
<p><i>Provincia:</i> Jujuy <i>Ciudad:</i> Perico <i>Latitud:</i> 24° 22' 33.35" S <i>Longitud:</i> 65° 07' 06.45" W <i>Altura:</i> 974.64 m.s.n.m. <i>Fecha:</i> Septiembre 2010</p>	<p><i>Croquis de Ubicación:</i></p> 	
<p><i>Descripción:</i> La estación Gravimétrica se halla a la izquierda de la puerta de acceso a la Iglesia de Purmamarca. El punto está ubicado a 1,25 m de la esquina izquierda de la columna y separada 0,3 m de la fachada. Quedando situada a la derecha de una gruta a nivel del piso.</p> <p><i>Description:</i> Gravimetric station is to the left of the access door to the Church of Purmamarca. The Point is located at 1.25 m in the left corner of the column and separated 0.3 m front the façade. Staying on the right of a cave at ground level.</p>		

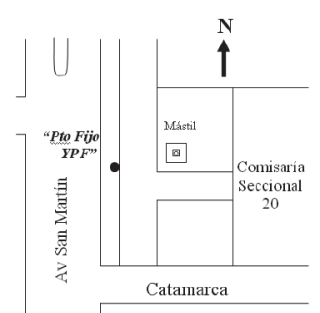

Monografía 2.

<p><i>País:</i> ARGENTINA</p>	<p><i>Nombre de Estación:</i> IGLESIA PURMAMARCA</p>	<p><i>Número de Estación:</i> AR-205</p>
<p><i>Provincia:</i> Jujuy <i>Ciudad:</i> Purmamarca <i>Latitud:</i> 23° 44' 49.8" S <i>Longitud:</i> 65° 29' 57.1" W <i>Altura:</i> 2295,02 m.s.n.m. <i>Fecha:</i> Septiembre 2010</p>	<p><i>Croquis de Ubicación:</i></p> 	
<p><i>Descripción:</i> La estación Gravimétrica se halla a la izquierda de la puerta de acceso a la Iglesia Santa Rosa de Lima de Purmamarca. El punto está ubicado a 1,25m de la esquina izquierda de la columna y separada 0,3m de la fachada. Quedando situada a la derecha de una gruta a nivel del piso.</p> <p><i>Description:</i> Gravimetric station is to the left of the access door to the Church Santa Rosa de Lima of Purmamarca. The point located at 1.25 m in the left corner of the column and separated 0.3 m of the front. Staying on the right of a groto at ground level.</p>		

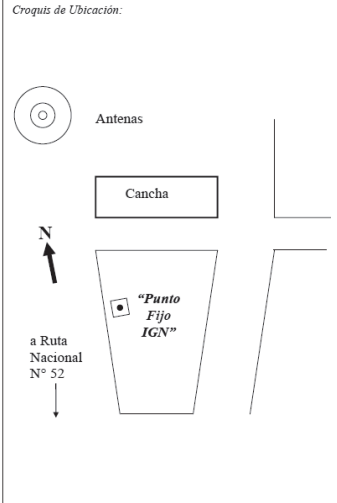


Monografía 3.

<p><i>País:</i> ARGENTINA</p>	<p><i>Nombre de Estación:</i> GRUTA CRUCE RUTAS 79 Y 52</p>	<p><i>Número de Estación:</i> AR-206</p>
<p><i>Provincia:</i> Jujuy <i>Ciudad:</i> Salinas Grandes <i>Latitud:</i> 23° 38' 38,4" S <i>Longitud:</i> 65° 50' 23,7" W <i>Altura:</i> 3363,74 m.s.n.m <i>Fecha:</i> Septiembre 2010</p>	<p><i>Croquis de Ubicación:</i></p> 	
<p><i>Descripción:</i> La estación de gravedad se encuentra en la intercepción de las rutas nacionales Ex 40 y 52, camino a Susques. El punto está ubicado sobre la esquina Noreste de la gruta, a 76 cm del del suelo.</p> <p><i>Description:</i> The gravity station is located in the interception of the national routes Ex-40 and 52. Susques way. The point is located on the North-east corner of the cave, to 76cm of the soil.</p>		

Monografía 4.

<p><i>País:</i> ARGENTINA</p>	<p><i>Nombre de Estación:</i> PUNTO ASTRONÓMICO YPF</p>	<p><i>Número de Estación:</i> AR-207</p>
<p><i>Provincia:</i> Jujuy <i>Ciudad:</i> Susques <i>Latitud:</i> 23° 23' 52,0" S <i>Longitud:</i> 66° 22' 02,6" W <i>Altura:</i> 3567,20 m.s.n.m. <i>Fecha:</i> Septiembre 2010</p>	<p><i>Croquis de Ubicación:</i></p> 	
<p><i>Descripción:</i> La observación fue realizada en el punto astronómico existente en la vereda de la comisaría de Susques, el mismo perteneciente a YPF, sobre Av San Martín. La medición fue realizada al pie del pilar que materializa dicho punto, sobre el contrapiso de la vereda, a una altura de 0.1m respecto del suelo.</p> <p><i>Description:</i> The observation was made in the existing astronomical point in the village of Susques station, the same belonging to YPF, on Avenida San Martín. The measurement was performed at the foot of the pillar that embodies this point, on the subfloor of the sidewalk. At a height of 0.1m respect the ground.</p>		

Monografía 5.

País: ARGENTINA	Nombre de Estación: PUNTO FIJO IGN PLAZA SUSQUES	Número de Estación: AR-208
Provincia: Jujuy Ciudad: Susques Latitud: 23° 23' 57,1'' S Longitud: 66° 21' 56,3'' W Altura: 3596,25 m.s.n.m. Fecha: Septiembre 2010	Croquis de Ubicación: 	
Descripción: La estación Gravimétrica se halla en un punto fijo del Instituto Geográfico Nacional (IGN), situado en la plaza de Susques, lindante a la calle occidental de la misma. El punto se encuentra sobre el botón. Description: Gravimetric station is in a fixed point on the National Geographic Institute (IGN), located in the Plaza de Susques, bordering the western side of the street itself. The point is on the button.		

Monografía 6.

Referencias

Baarda, W., 1968. "A Testing Procedure for use in Geodetic Networks", Netherlands Geodetic Commission, *Publications on Geodesy*, vol. 2, number 5.

———, 1965. "Precision, Accuracy and Reliability of Observations", *Report I.A.G. Symposium*, Lisbon, Reprint, Delf.

Klinge, E.; Kahle, H. G. 1979. "Assessment of secular gravity changes in Fennoscandia", *The XVII General Assembly of the IUGG*, Canberra, December.

Kmenta, J., 1980. *Elementos de Econometría*, Ed. Vicens-Vives, S.A., España.

Sevilla, M. J., 1190. "Análisis Estadístico de Observaciones Geodésicas antes de la Compensación", *Física de la Tierra*, núm. 2, pp. 87-110, Ed. Univ. Compl, Madrid.

Werenitzky Curia, Ma. C.; Pastorino, Ma. I., 2009. *Sistema Integral para el Procesamiento de Datos Geofísicos (SI-GEO)*, 1ra. Ed. en CD, Tucumán, Argentina.