



Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina

Dirección de Geodesia

**Instituto Geográfico
Nacional**

– 2016 –

La medición de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina fue realizada por el Instituto Geográfico Nacional. El procesamiento, ajuste y la confección del presente informe fue llevado a cabo por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Índice

Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Sistema Gravimétrico Potsdam	2
1.1.2. Base de Calibración de la República Argentina (BACARA)	3
1.1.3. Red de Estandarización Gravimétrica Internacional (IGSN71)	4
1.1.4. Primera Red Gravimétrica Absoluta	5
1.1.5. Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA)	6
1.1.6. Red Gravimétrica de Segundo Orden (RSO-Ar)	8
1.2. Motivación y objetivos	9
2. Medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina (RPO-Ar)	10
2.1. Distribución de los Puntos	10
2.2. Planificación de Campañas de Medición Gravimétrica	11
2.3. Medición de la Red	11
2.4. Instrumental Utilizado	13
2.4.1. Gravímetro LaCoste & Romberg™	14
2.4.2. Gravímetro Scintrex™ Autograv CG-5	15
2.5. Control de Lecturas Observadas	15
3. Procesamiento, Análisis y Ajuste de las Observaciones	18
3.1. Análisis y Selección de Programas de Procesamiento	18
3.2. Análisis y Selección de Programas de Ajuste	18
3.3. Ajuste de la Red de Gravedad	19
3.4. Resultados Finales	23
3.5. Análisis de los Resultados	26
4. Conclusiones	29
Anexo I – Marea Terrestre y Deriva Instrumental	30
1.1. Marea Terrestre	30
1.2. Deriva Instrumental	30
Anexo II – Tablas de Conversión de Lecturas	32
1.1. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-043	32
1.2. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-069	33
1.3. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-673	34
Referencias	35

Índice de Figuras

Figura 1: Red BACARA	4
Figura 2: Red IGSN71	5
Figura 3: Primera Red Gravimétrica Absoluta	6
Figura 4: Red RAGA	7
Figura 5: Distribución de los puntos de la RSO-Ar.....	8
Figura 6: Distribución de los puntos de nodales de la red de nivelación	10
Figura 7: Planificación de la medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden	11
Figura 8: Método de medición sin reobservación de puntos intermedios.....	12
Figura 9: Método de ida y vuelta	12
Figura 10: Ajuste de la RPO-Ar. Las líneas verdes simbolizan las mediciones, los puntos naranjas representan los puntos de la red RAGA y los azules los puntos de la RPO-Ar.	13
Figura 11: Gravímetro Lacoste & Romberg™. Operador del instrumental: Diego Denett.	14
Figura 12: Gravímetro Scintrex™ Autograv CG-5. Operador del instrumental: Dante Saganías.	15
Figura 13: Circuito medido el 26 de diciembre de 2012	17
Figura 14: Histograma de residuos obtenidos del ajuste	26
Figura 15: Histograma de las diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas	28

Índice de Tablas

Tabla 1: Coordenadas y gravedades finales de la Primera Red Gravimétrica Absoluta	5
Tabla 2: Coordenadas y gravedades finales de la red RAGA	7
Tabla 3: Coordenadas y gravedades de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden	23
Tabla 4: Estadísticas de los resultados obtenidos	26
Tabla 5: Diferencias entre los valores de gravedad históricos y los que surgen de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden	26

Resumen

En el año 2011, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), en función de la misión que le fuera asignada mediante la Ley de la Carta (Ley N°22.963), comenzó la planificación para actualizar el Marco de Referencia Gravimétrico Nacional. A fines de ese año, el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, a solicitud del IGN organizó una jornada técnica regional referida a las metodologías de medición y cálculo gravimétrico para determinar una nueva Red Nacional Gravimétrica de Primer Orden. Gran parte de los investigadores y profesionales referentes en esta temática a nivel Nacional y de la República Federativa de Brasil asistieron a esta reunión, en la cual se debatieron los diferentes procedimientos necesarios para materializar la nueva red gravimétrica basándose en los estándares geodésicos internacionales vigentes.

La nueva Red Gravimétrica de Primer Orden se determinó a partir de la medición de 227 puntos distribuidos en forma homogénea sobre el territorio Nacional y que coinciden, en su mayoría, con los nodales de la Red de Nivelación de Alta Precisión. Las mediciones fueron procesadas y ajustadas a la Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA) utilizando los programas GRAVDATA (Drewes, 1995) y GRADJ (Forsberg, 1993) respectivamente. El cálculo de la corrección de marea se llevó a cabo utilizando el modelo propuesto por Cartwright y Edden (1973), que aproxima el potencial de la marea terrestre a una serie de armónicos esféricos con un total de 505 coeficientes. Los valores de gravedad finales surgen de un ajuste por mínimos cuadrados; considerando los valores de deriva del instrumental y las precisiones de las lecturas.

Los principales colaboradores en la medición de la red fueron la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), la Universidad Nacional de Rosario (UNR) y la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), mientras que en el procesamiento de la información participó la UNLP. En este trabajo se presenta el procesamiento y ajuste de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden, los resultados de dicho ajuste y el análisis de los resultados.

1. Introducción

La Gravimetría es una disciplina de la Geodesia que tiene por objeto la determinación del campo de gravedad terrestre. La medición de dicho campo se realiza mediante diversas técnicas e instrumentos (terrestres, marinos y satelitales).

Las principales aplicaciones de la Gravimetría son las siguientes:

- Determinar distintos tipos de alturas físicas, tales como ortométricas, dinámicas y normales;
- Definir modelos de geoide gravimétricos;
- Conocer la distribución y composición de las masas en el interior de la Tierra;
- Detectar distintas estructuras geológicas dentro de la corteza terrestre; y
- Contribuir con el proceso de prospección de hidrocarburos y otros minerales.

A fines del año 2011, en el marco de una jornada técnica organizada por el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (CNUGGI) celebrada en la ciudad de Rosario, se presentó para su análisis el proyecto de materialización de una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina (RPO-Ar) que sirviera para reemplazar la antigua red BACARA (Instituto Geográfico Militar, 1971).

En la reunión estuvieron presentes representantes de diferentes universidades nacionales vinculadas con la temática, tales como la Universidad de Buenos Aires (UBA), la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), la Universidad Nacional de Rosario (UNR), la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y la Universidad Nacional de Tucumán (UNT), como así también representantes de la Universidad de San Pablo (República Federativa de Brasil) y del Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE). En la jornada se debatió sobre las diferentes posibilidades y estrategias de medición y cálculo de la red.

En el año 2012, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), comenzó las mediciones de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden, con una importante colaboración de la UNSJ, la UNR y la UNLP, que aportaron parte del instrumental que permitió mayor redundancia y calidad en las observaciones. Las mediciones concluyeron a comienzos del año 2015.

1.1. Antecedentes

Existen en Argentina diversas redes gravimétricas que cubren el Territorio Nacional. A continuación se enumeran dichas redes y sus principales características:

1.1.1. Sistema Gravimétrico Potsdam

En el año 1909, durante la XVI Conferencia de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) celebrada en la ciudad de Londres, se adopta como Datum Gravimétrico al Sistema Potsdam, que reemplazó al entonces vigente Sistema Viena, oficializado durante la XIII Conferencia de la IAG llevada a cabo en la ciudad de París en el año 1900. La precisión del Sistema Potsdam fue estimada en ± 3 mGal y corregía al Sistema Viena en -16 mGal (Morelli et al., 1972).

En el año 1906 se inicia la actividad gravimétrica dentro del Instituto Geográfico Militar (IGM) mediante la vinculación *Buenos Aires-Potsdam*, llevada a cabo con un aparato cuadripéndulo Von Sterneck.

En el año 1928, el Ing. Félix Aguilar realiza una segunda vinculación con Potsdam mediante un nuevo equipo cuadripendular Askania Werke compuesto por cuatro péndulos de invar. En ese mismo año se efectúa una determinación gravimétrica en el pilar del Observatorio Astronómico de La Plata, que había sido vinculado a una estación gravimétrica en Padua, Italia, en el año 1905. Más tarde, se realiza otra vinculación al Observatorio Nacional de Córdoba, que había sido adoptado como punto astronómico fundamental.

En el año 1952 comienzan a funcionar las nuevas instalaciones del IGM (denominadas Sargento Mayor Ingeniero Álvarez de Condarco) en el partido de San Martín (provincia de Buenos Aires) y se construye el pilar gravimétrico *Estación Fundamental Buenos Aires A* en uno de los sótanos. Dos años más tarde, en 1954, se vincula ese pilar a Bad Hardzburg (Alemania) utilizando un moderno equipo cuadripendular Askania, y se determina el valor del nuevo Datum Gravimétrico Nacional: 979705,0 mGal.

1.1.2. Base de Calibración de la República Argentina (BACARA)

La Base de Calibración de la República Argentina (BACARA) constituyó la antigua Red Gravimétrica de Primer Orden de nuestro país. La denominada Operación BACARA fue llevada a cabo entre los meses de junio y octubre del año 1968, mediante una labor conjunta del IGM, Yacimientos Petrolífero Fiscales (YPF), el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Instituto de Geodesia (IG) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, con la colaboración del Servicio Geodésico Interamericano (IAGS) (Instituto Geográfico Militar, 1971).

La Operación BACARA permitió la determinación de 86 valores de gravedad en la Argentina (Figura 1), 21 en Bolivia, 3 en Uruguay y 2 en Paraguay. La medición se llevó a cabo con 4 gravímetros LaCoste & Romberg facilitados por el IAGS (G-056, G-057, G-145 y G-146) y 1 gravímetro Worden provisto por el IG. Los traslados se realizaron mediante aviones Beechcraft C45 pertenecientes a la Aviación Naval Argentina. Se volaron un total de 35.000 km en 140 horas. Los puntos gravimétricos se localizaron en aeródromos de uso comercial o en puntos cercanos a los mismos sobre caminos pavimentados.

La calibración de los instrumentos se llevó a cabo a partir de la Base de Calibración Argentina para Gravímetros Estáticos del IG, compuesta por 13 estaciones en las ciudades de Ushuaia, Río Gallegos, San Julián, Comodoro Rivadavia, Trelew, San Miguel de Tucumán, Salta y Orán.

La red BACARA fue compensada en dos oportunidades. La primera compensación fue realizada por el IGM, mientras que la segunda fue ejecutada por el SHN conjuntamente con el IG. Ambas compensaciones fueron ajustadas al Sistema Potsdam y los desvíos estándar de sus valores gravimétricos fueron inferiores a +/- 0,099 mGal (Instituto Geográfico Militar, 1970). Los resultados finales del proyecto BACARA fueron publicados en el informe Nacional presentado durante la XV Asamblea General de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG) celebrada en la ciudad de Moscú en el año 1971.



Figura 1: Red BACARA

1.1.3. Red de Estandarización Gravimétrica Internacional (IGSN71)

En el año 1971, durante la XV Asamblea General de la IUGG celebrada en la ciudad de Moscú, se adopta a la Red Gravimétrica IGSN71 (*International Gravity Standardization Net 1971*) como el nuevo Sistema Gravimétrico Internacional, reemplazando, al hasta entonces vigente Sistema Potsdam. La red se materializó con 1854 estaciones cuyos valores gravimétricos surgen de una compensación por mínimos cuadrados, en la cual participaron observaciones pendulares, relativas y absolutas de todo el mundo. Los desvíos estándar de los valores gravimétricos fueron inferiores a $\pm 0,1$ mGal (Morelli et al., 1972).

En Argentina, 11 puntos de la nueva red IGSN71 coincidieron con puntos de la red BACARA. En el año 1988, el IGM desarrolló un programa de compensación de redes gravimétricas en lenguaje FORTRAN, basado en los trabajos realizados por el Dr. Hermann Drewes, que permitió la transformación de la red BACARA al sistema gravimétrico IGSN71 a partir de los esos puntos.



Figura 2: Red IGSN71

1.1.4. Primera Red Gravimétrica Absoluta

En el año 1988 se lleva a cabo la primera parte del proyecto de medición absoluta de la gravedad con el gravímetro interferométrico JILAG-3, perteneciente al Instituto de Geodesia de la Universidad de Hannover. Este proyecto contó con el auspicio del mencionado Instituto (cuyo Director era el Dr. Wolfgang Torge), del Instituto de Geodesia de la Universidad de Buenos Aires y del IGM, y posibilitó la medición de la gravedad en forma absoluta sobre puntos localizados en Buenos Aires (Estación Fundamental Buenos Aires A), Tandil y Salta. En el año 1991 se ejecuta la segunda etapa del proyecto de medición absoluta de la gravedad, esta vez en una estación próxima a la Estación Fundamental Buenos Aires A (debido a un problema de napas freáticas que afecta a esa zona del Partido de San Martín no se pudo estacionar el equipo en dicho punto), en San Juan y en Comodoro Rivadavia (Figura 3) (Torge et al., 1995).

En la Tabla 1 se pueden observar las coordenadas y los valores de gravedad que fueron determinados en los años 1988 y 1991.

Tabla 1: Coordenadas y gravedades finales de la Primera Red Gravimétrica Absoluta

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]
CORI	-45.824639	-67.463500	980663.759
IGN2	-34.573611	-58.519444	979690.069
IGN3	-34.573611	-58.519444	979689.141
ZOND	-31.545278	-68.684361	979141.649
SLOR	-24.721278	-65.504639	978409.410
TAN1	-37.321667	-59.082500	979904.352

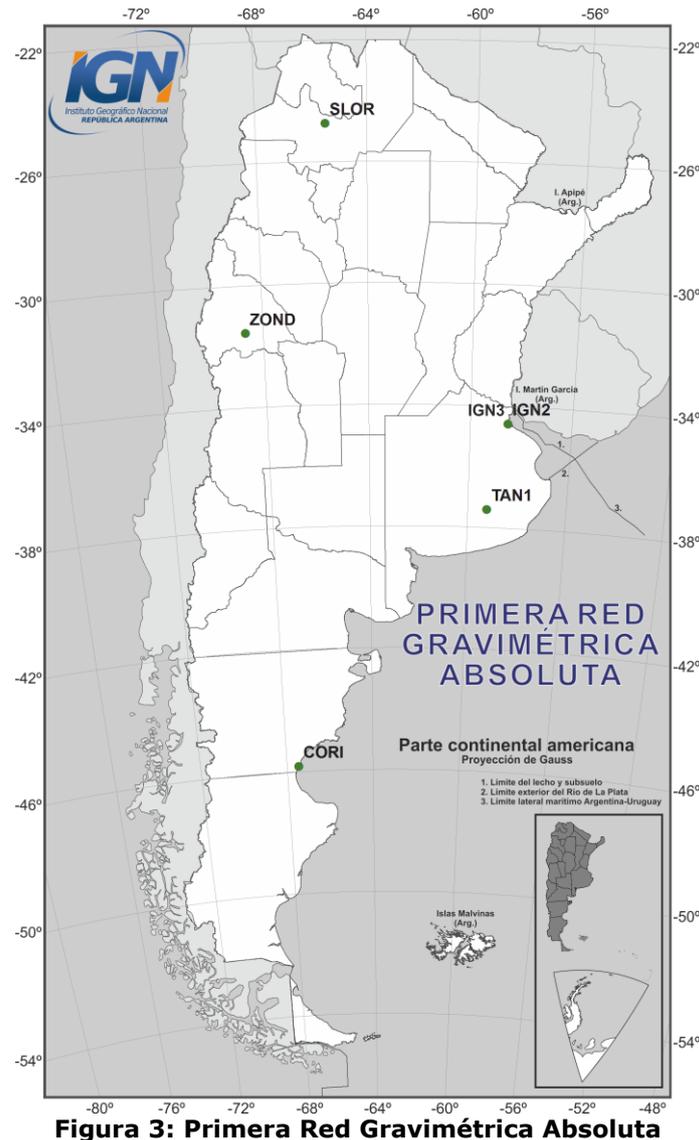


Figura 3: Primera Red Gravimétrica Absoluta

1.1.5. Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA)

Durante los años 2013 y 2014, en un trabajo conjunto entre el IGN, la UNR, la Universidad de San Pablo (USP), el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), la UNSJ y la UNLP se logró materializar una red integrada por 35 puntos de gravedad absoluta uniformemente distribuidos a lo largo del territorio Nacional y uno en la República Oriental del Uruguay (Figura 4).

La medición se llevó a cabo con dos gravímetros absolutos Micro-g LaCoste A-10, #32 y #14, pertenecientes a la USP y el IRD respectivamente. El procesamiento de la red RAGA se realizó simultáneamente en la USP, el IGN y el IRD, a partir del cual se obtuvieron las gravedades finales de las 36 estaciones gravimétricas con un desvío estándar de $\pm 0,02$ mGal (Lauría et al., 2015).

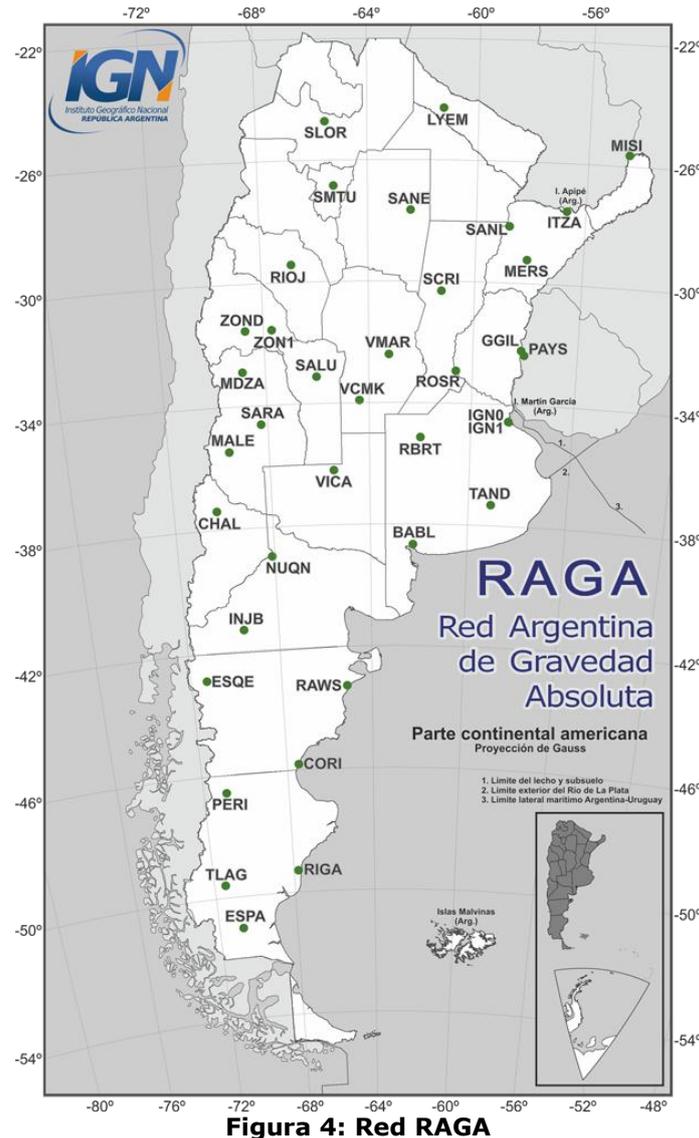


Figura 4: Red RAGA

En la Tabla 2 se pueden observar las coordenadas y los valores de gravedad que fueron determinados para los 36 sitios que componen la red RAGA.

Tabla 2: Coordenadas y gravedades finales de la red RAGA

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]
BABL	-38.667417	-62.232333	980046.225	NUQN	-38.962944	-68.098111	979965.718
CHAL	-37.388972	-70.256472	979653.626	PAYS	-32.378278	-58.029944	979523.523
CORI	-45.824639	-67.463500	980663.760	PERI	-46.589694	-70.926361	980624.557
ESPA	-51.029639	-70.777167	981084.686	RAWS	-43.299417	-65.107194	980458.033
ESQE	-42.898333	-71.296889	980231.722	RBRT	-35.140917	-61.972722	979723.693
GGIL	-32.216556	-58.147028	979517.779	RIGA	-49.299611	-67.771694	980993.919
IGN1	-34.572667	-58.516333	979688.239	RIOJ	-29.425333	-66.862250	979042.376
INJB	-41.321167	-69.503444	980021.640	ROSR	-32.947833	-60.630583	979548.444
ITZA	-27.584250	-56.688194	979122.745	SALU	-33.120833	-66.025278	979316.985
LYEM	-24.280806	-61.236333	978882.640	SANE	-27.644861	-62.413833	979123.329
MALE	-35.482861	-69.585694	979325.663	SANL	-28.137583	-58.768833	979165.409
MDZA	-32.893639	-68.876306	979199.554	SARA	-34.632083	-68.259694	979495.707
MERS	-29.227111	-58.072556	979239.943	SCRI	-30.310000	-61.242278	979327.540
MISI	-25.638222	-54.538972	978905.491	SLOR	-24.721278	-65.504639	978409.389

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]
SMTU	-26.843417	-65.230167	978886.042	VICA	-36.216972	-65.436667	979752.736
TAND	-37.323528	-59.082000	979903.712	VMAR	-32.409389	-63.216667	979473.584
TLAG	-49.598639	-71.444889	980959.907	ZON1	-31.545278	-68.684361	979141.662
VCMK	-33.916500	-64.368111	979580.009	ZOND	-31.545278	-68.684361	979141.679

1.1.6. Red Gravimétrica de Segundo Orden (RSO-Ar)

La RSO-Ar es coincidente con los puntos Nodales y los puntos altimétricos que componen la Red de Nivelación de Alta Precisión Nacional. Hasta el año 1988, los puntos de la RSO-Ar fueron vinculados a la red BACARA y por lo tanto muchos de sus valores de gravedad fueron transformados al sistema IGSN71 mediante una corrección de -14.93 mGal (Moirano et al., 2002).

La red está compuesta por aprox. 240 puntos Nodales y aprox. 14000 pilares (Figura 5) que coinciden (en su mayoría) con puntos altimétricos de la Red de Nivelación de Alta Precisión (Piñón et al., 2014).

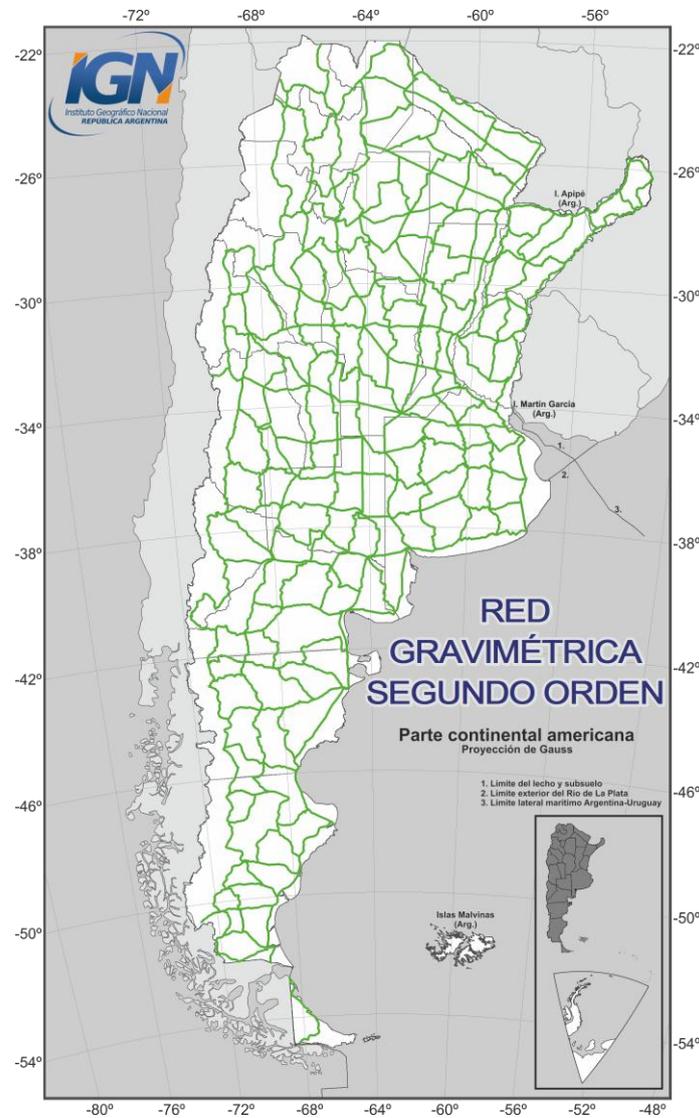


Figura 5: Distribución de los puntos de la RSO-Ar

1.2. Motivación y objetivos

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de determinar una nueva Red Gravimétrica Nacional de Primer Orden que respete los estándares geodésicos internacionales vigentes y que esté compuesta por puntos de fácil accesibilidad y distribuidos en forma homogénea sobre el territorio Nacional. Esta nueva red reemplaza a la antigua red BACARA, medida en el año 1968 y compuesta por una gran cantidad de puntos que en la actualidad están destruidos o son de difícil acceso (dentro de aeropuertos o aeródromos).

Por otra parte, la materialización de la red RAGA, que permite obtener un ajuste óptimo, y la adquisición de nuevo instrumental gravimétrico, que posibilita mediciones muy precisas, se conjugaron para brindar las condiciones necesarias para llevar a cabo este trabajo.

Los principales objetivos de este proyecto fueron los siguientes:

- Definir una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden que esté compuesta por puntos nodales, distribuidos en forma homogénea sobre el territorio Nacional y de fácil acceso;
- Realizar el ajuste de los valores gravimétricos de la Red Gravimétrica de Primer Orden a los puntos de gravedad absoluta de RAGA;
- Asegurar mediante los métodos de medición y cálculo que la precisión gravimétrica de los puntos que componen la red sea menor o igual a 0,05 mGal;
- Realizar un análisis sobre las variaciones gravimétricas determinadas sobre aquellos puntos que fueron medidos anteriormente;
- Contribuir a la integración de las redes gravimétricas nacionales y continentales; y
- Contribuir al cálculo de un nuevo geoide para la Argentina y América del Sur.

2. Medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina (RPO-Ar)

2.1. Distribución de los Puntos

En base a recomendaciones geodésicas internacionales se determinó que la nueva red gravimétrica debía materializarse a través de los puntos nodales de la red de nivelación (Figura 6) debido a lo siguiente:

- Los puntos nodales tiene valores de altura precisos;
- Los puntos nodales ofrecen gran estabilidad debido a su construcción (pilares de 1 m³ de hormigón);
- El acceso a los puntos nodales es muy sencillo (generalmente han sido construidos en plazas públicas); y
- La distribución de los puntos nodales es homogénea y cubre todo el territorio Nacional.

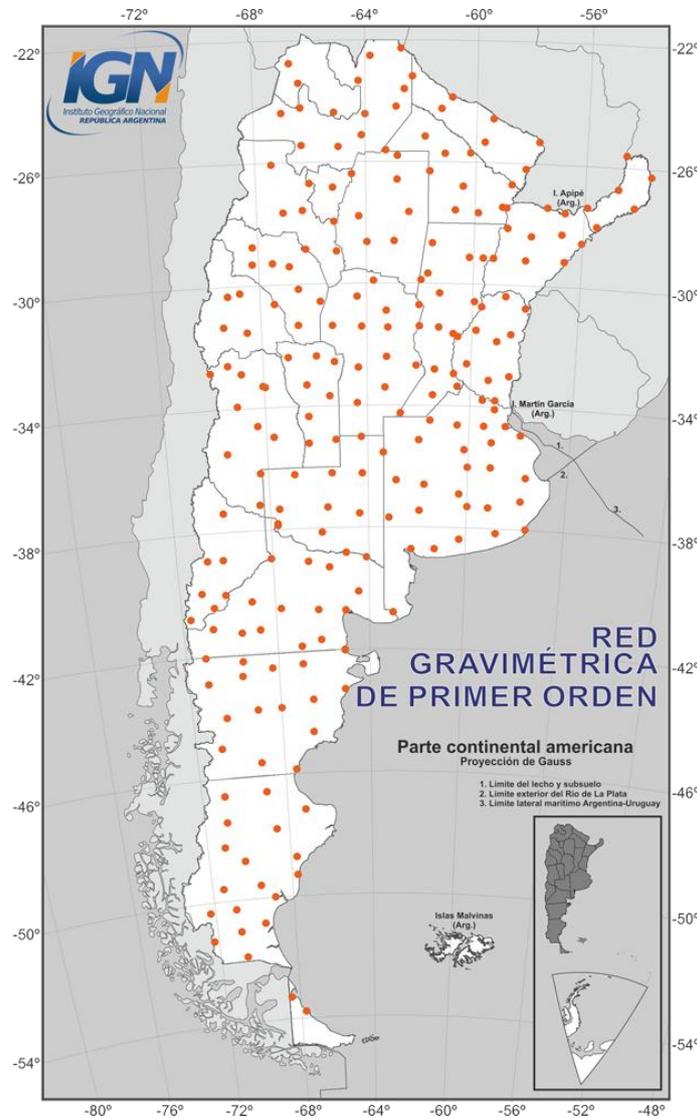


Figura 6: Distribución de los puntos de nodales de la red de nivelación

2.2. Planificación de Campañas de Medición Gravimétrica

La medición de la red fue dividida en seis etapas o campañas (norte, central, litoral, cuyo, sur, remediciones) que fueron llevadas a cabo entre los años 2012 y 2015 (Figura 7). En la organización de las mismas se tuvieron en cuenta las diferentes épocas del año de acuerdo a la zona geográfica a medir.

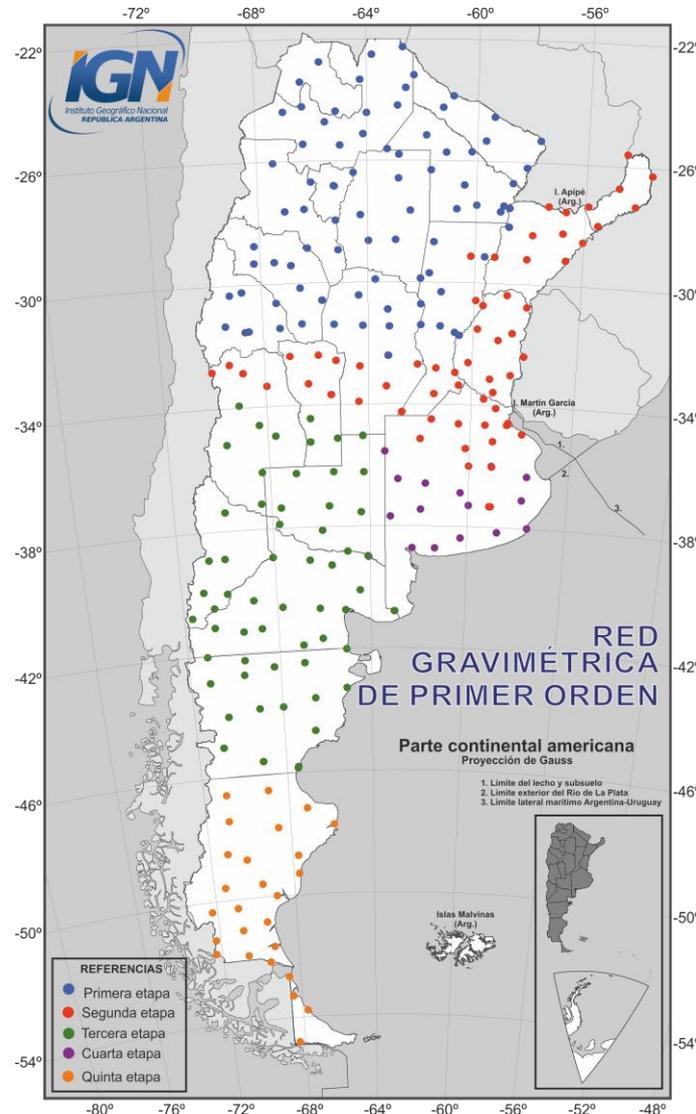


Figura 7: Planificación de la medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden

2.3. Medición de la Red

Previo a la medición, se llevó a cabo la planificación de cada una de las campañas. Dicha planificación consistió en la diagramación y determinación de los circuitos gravimétricos o "rulos" que se debían observar.

Se utilizaron dos tipos de circuitos para la medición de las estaciones gravimétricas. El primero es denominado "medición sin reobservación de puntos intermedios" y consiste en la observación de un número determinado de estaciones gravimétricas (PG), partiendo en un punto base y finalizando el día de medición en el mismo punto base (Figura 8).

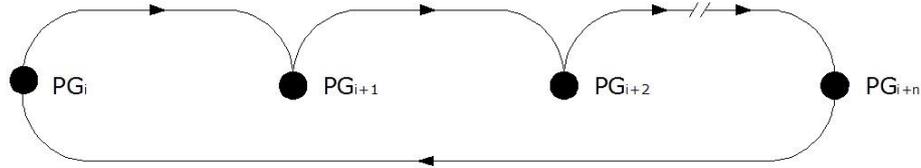


Figura 8: Método de medición sin reobservación de puntos intermedios

Si bien no existe una distancia recomendada entre los puntos de medición, la misma dependerá de las necesidades específicas del levantamiento. En el caso de la Red Gravimétrica de Primer Orden, la distancia entre las estaciones varía entre 100 y 300 km.

Se debe realizar la reobservación de la estación base con el fin de realizar el cálculo y el control de la deriva dinámica a lo largo de cada día. Esta reobservación deberá realizarse dentro del mismo día de medición.

El largo del circuito de medición o la cantidad de puntos que se miden a lo largo del día depende del tiempo que se tarde en recorrer y medir dichos puntos siempre y cuando no se exceda una cantidad de 12 horas entre la medición del punto base y la reobservación del mismo.

Cada circuito se realizó con al menos tres gravímetros debidamente calibrados previo a la realización de cada campaña con el fin de minimizar errores de observación. El mismo circuito se midió con cada gravímetro independientemente, sin mezclar observaciones de distintos gravímetros.

El segundo método, usualmente denominado "de ida y vuelta", consiste en medir dos veces cada punto: una vez en la "ida" y una segunda oportunidad en la "vuelta" (Figura 9).

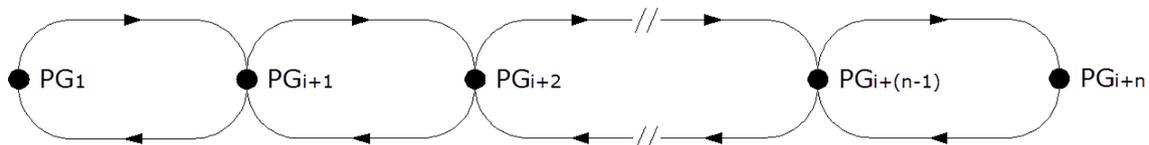


Figura 9: Método de ida y vuelta

Este método consiste en medir sucesivamente las estaciones seleccionadas en el circuito (ida) y realizar la reobservación (vuelta) de las estaciones siguiendo el camino inverso.

Si bien este método implica invertir más tiempo para la medición de un circuito, la ventaja radica en que se puede efectuar un mejor estudio de la deriva dinámica ya que se tendrán dos observaciones de cada estación del circuito.

Por otra parte, el hecho de tener dos observaciones de un mismo punto permite controlar la calidad de la observación y detectar posibles errores en la medición (por ejemplo, errores de observación).

Para la generación de los circuitos gravimétricos, se implementó el uso de puntos auxiliares (estaciones próximas a los puntos que componen la red), que permiten observar dos veces todos los puntos de cada circuito. En la Figura 10 se pueden observar las mediciones realizadas entre los puntos que componen la Red de Primer Orden y la vinculación a la red RAGA.

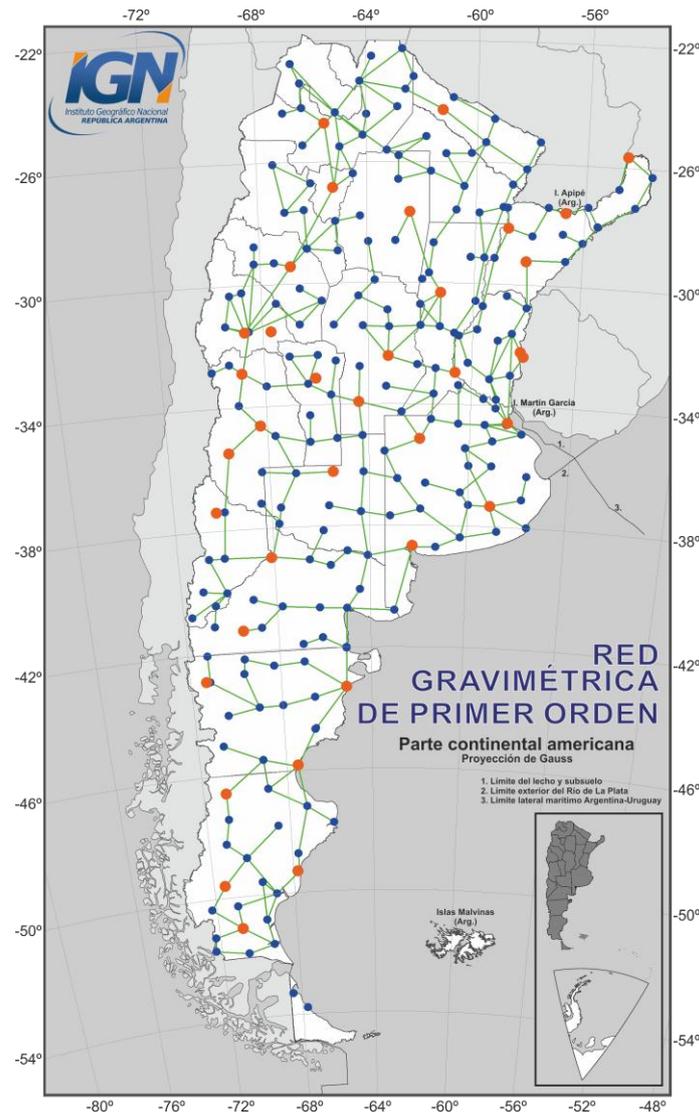


Figura 10: Ajuste de la RPO-Ar. Las líneas verdes simbolizan las mediciones, los puntos naranjas representan los puntos de la red RGA y los azules los puntos de la RPO-Ar.

2.4. Instrumental Utilizado

Cuando se realiza una medición de gravedad con gravímetros relativos, la señal es afectada por ruidos o incluso por otras señales. Estos efectos que distorsionan la señal de interés deben ser correctamente modelados y eliminados antes de obtener valores de gravedad para cada estación medida. Algunas de estas señales son:

- Marea terrestre: es la señal debida a la atracción gravitatoria que generan la Luna, el Sol y otros planetas sobre la Tierra. Ésta es una señal periódica en el tiempo y modelable bajo distintas aproximaciones (ver Anexo I).
- Drift o deriva del instrumental: es el efecto debido al desgaste propio de los resortes internos de los equipos (ver Anexo I).
- Saltos en los niveles del gravímetro que se observan midiendo en una misma estación, relacionados al transporte del equipo (golpes, etc.). Los equipos son extremadamente sensibles y por esta razón su transporte debe realizarse con los cuidados indicados.

Existen otros efectos sobre la señal, los cuales suelen ser tenidos en cuenta en trabajos de microgravedad, como por ejemplo los efectos de presión atmosférica y de temperatura. Por otra parte, existen otros efectos de carácter natural que también afectan la medición. Éstos tienen que ver con:

- Sismos;
- Microsismos (por ejemplo, construcciones cercanas al punto de medición) y carga oceánica; y
- Carga hidrológica, entre otros.

El instrumental utilizado para la realización de las campañas gravimétricas fue:

- LaCoste & Romberg™ G-043 propiedad del IGN
- LaCoste & Romberg™ G-069 propiedad de la UNR
- LaCoste & Romberg™ G-673 propiedad del IGN
- Scintrex™ AUTOGRAV CG-5 #40484 propiedad de la UNSJ, UNLP y UNR
- Scintrex™ AUTOGRAV CG-5 #41218 propiedad del IGN

En el Anexo II se muestran las tablas utilizadas para la transformación de los gravímetros *LaCoste & Romberg*™. En el caso de los gravímetros *Scintrex*™ CG-5, el factor de transformación de lecturas utilizado fue 1.

2.4.1. Gravímetro LaCoste & Romberg™

El gravímetro LaCoste & Romberg™ (Fett, 1992) está basado en un sistema "masa-resorte", cuyo resorte tiene una "longitud cero" y que fuera diseñado por LaCoste y Romberg en el año 1934. El gravímetro LaCoste & Romberg™ modelo G cuenta con un rango de medición de 7000 mGal, que resulta muy útil en trabajos de carácter geodésico. Su peso aproximado es de solamente 3,6 Kg y está montado dentro de una cámara adiabática construida en *fiberglass*. El interior de la cámara es relleno con un gas seco e inerte, que se calienta termostáticamente a una temperatura de 50°C mediante una resistencia eléctrica. Esto evita los cambios de presión barométrica y la expansión o contracción de los metales dentro del gravímetro.

La sensibilidad que se alcanza con los gravímetros LaCoste & Romberg™ es de 0,004 mGal y la precisión que se puede obtener oscila entre 0,01 y 0,05 mGal (Torge, 1989).



**Figura 11: Gravímetro LaCoste & Romberg™.
Operador del instrumental: Diego Denett.**

2.4.2. Gravímetro Scintrex™ Autograv CG-5

El gravímetro automático Scintrex™ Autograv CG-5 utiliza el principio de anulación electrostática para registrar diferencias de gravedad entre puntos distribuidos sobre la superficie terrestre a partir de un sensor de cuarzo fundido (Scintrex Limited, 2009). Este gravímetro cuenta con un rango de medición de 8000 mGal y una resolución de lectura de 0,001 mGal, que lo convierten en un equipo muy útil y preciso para trabajos geodésicos.

El Scintrex™ Autograv CG-5 pesa aproximadamente 8 kg (incluyendo las baterías), lo cual permite un sencillo transporte. Además, el mismo contiene una antena GPS que permite determinar las coordenadas de la estación observada para determinar las correcciones de marea en forma sencilla.



**Figura 12: Gravímetro Scintrex™ Autograv CG-5.
Operador del instrumental: Dante Saganías.**

2.5. Control de Lecturas Observadas

Para poder controlar las observaciones realizadas en el transcurso de las sucesivas campañas, el IGN desarrolló un programa en lenguaje PHP denominado "Control-G". Este programa permite realizar de forma rápida y sencilla un control diario de las lecturas observadas, con el propósito de conocer la precisión de las mismas y la necesidad de repetir alguna medición.

A partir de una planilla en formato Excel™ que contiene las lecturas gravimétricas, "Control-G" realiza la conversión de las lecturas de unidades instrumentales a mGal. Dicha conversión se realiza mediante Tablas de Calibración para el caso de los gravímetros Lacoste & Romberg™ (ver Anexo II). En el caso de los gravímetros Scintrex™, las lecturas ya se encuentran en unidades de mGal. Luego, a partir del software GRAVDATA (Drewes, 1978), el programa realiza la corrección por mareas terrestres.

Asimismo, "Control-G" determina la deriva lineal diaria para cada gravímetro. En caso que el valor calculado sea superior a 0,007 mGal/hora el programa advierte al operador para que controle el instrumental.

A continuación se puede observar un ejemplo numérico de los resultados de la ejecución del programa "Control-G", para una serie de observaciones gravimétricas llevadas a cabo el día 26 de diciembre de 2012 utilizando 3 gravímetros relativos (Figura 13: Circuito medido el 26 de diciembre de 2012): Scintrex CG-5, LaCoste & Romberg G-069 y LaCoste & Romberg G-673. Dicho programa determina el valor de la deriva para cada uno de los instrumentos utilizados en la medición e informa si la medición de los puntos es correcta o debe remedirse algún circuito:

FECHA: 20121226

INST	DERIVA	OBS_DERIVA	HS
5	-0.003	Aceptado	12.57
69	0.001	Aceptado	12.55
673	-0.001	Aceptado	12.50

INST	ESTACIÓN	DIF. HORA	DIF. DELTA G	OBS
5	N099	11.97	0.016	Aceptado
5	N094	8.48	-0.008	Aceptado
5	N077	2.95	-0.008	Aceptado
5	TAND	0.72	-0.003	Aceptado
69	N099	11.92	-0.028	Aceptado
69	N094	8.42	0.004	Aceptado
69	N077	2.97	0.002	Aceptado
69	TAND	0.63	0.040	Aceptado
673	N099	11.43	-0.008	Aceptado
673	N094	8.38	-0.035	Aceptado
673	N077	2.98	-0.005	Aceptado
673	TAND	0.70	0.007	Aceptado

Se pueden distinguir dos bloques en el archivo de resultados: el bloque superior indica la deriva horaria de cada instrumento y la duración en horas del circuito. En el caso que la deriva fuese superior a 0,007 mGal/hora en la columna "OBS_DERIVA" se podrá observar una leyenda que indica al operador que debe controlar el instrumento.

El bloque inferior indica la cantidad de horas transcurridas entre las dos mediciones gravimétricas (es decir, "ida" y "vuelta") sobre un mismo punto (en el ejemplo: N099, N094, N077 y TAND), y la diferencia de gravedad obtenida entre dichas observaciones (en el ejemplo las diferencias siempre fueron inferiores a 0,04 mGal). En caso que alguna diferencia supere 0,05 mGal la columna "OBS" indicará la necesidad de remedir el punto.

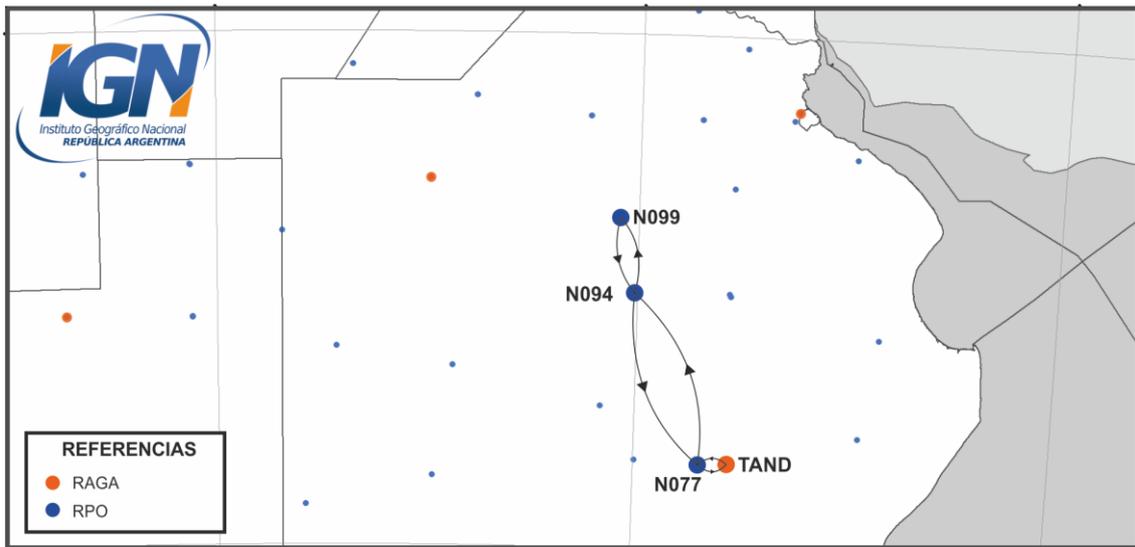


Figura 13: Circuito medido el 26 de diciembre de 2012

3. Procesamiento, Análisis y Ajuste de las Observaciones

3.1. Análisis y Selección de Programas de Procesamiento

Una vez concluidas las etapas de medición y control de las lecturas observadas, fue necesario corregir las observaciones gravimétricas debido a las mareas terrestres y a la deriva del instrumental. Para definir el procedimiento de reducción por mareas se analizaron los siguientes programas:

- GRAVDATA (Drewes, 1978). Este programa utiliza una aproximación en armónicos esféricos de grado 505 para el cálculo de las mareas.
- GREDE (Forsberg, 1981). Este programa utiliza las ecuaciones de Longman (1959) para calcular las mareas; y
- GRAVS2 (Oja, 2008). Este programa está basado en un paquete diseñado por Forsberg (1981) y permite calcular las correcciones de mareas con distinto número de armónicos esféricos (378, 505, 656 y 1200). También permite calcular reducciones por movimiento del polo, temperatura y presión.

La principal diferencia de estos programas reside en el grado máximo de armónicos esféricos que se utilizan para realizar la aproximación. Antokoletz et al. (2014) presentaron una comparación entre algunos modelos disponibles a partir de diferentes aproximaciones en armónicos esféricos. Los modelos analizados fueron los siguientes:

- Doodson (1921): 378 coeficientes en armónicos esféricos;
- Cartwright and Tayler (1971): 505 coeficientes en armónicos esféricos;
- Cartwright and Edden (1973): 505 coeficientes en armónicos esféricos;
- Büllfeld (1985): 656 coeficientes en armónicos esféricos; y
- Tamura (1987): 1200 coeficientes en armónicos esféricos.

Antokoletz et al. (2014), concluyen que las diferencias entre los modelos analizados y el modelo propuesto por Cartwright y Edden (que fuera recomendado por la Asociación Internacional de Geodesia a través de la Resolución N°16 del año 1983 para la corrección de datos gravimétricos) son, en todos los casos, menores a 0,001 mGal (siendo esta diferencia menor a la resolución de los gravímetros involucrados en este trabajo). Por otra parte, (Bonvalot et al., 1998), plantean que las correcciones de marea derivadas de las ecuaciones de Longman (1959) no son lo suficientemente precisas para estudios de microgravedad.

A partir de las conclusiones presentadas en los dos trabajos anteriormente citados, se resolvió aplicar el modelo de Cartwright y Edden a través del uso del programa GRAVDATA para corregir las observaciones gravimétricas.

3.2. Análisis y Selección de Programas de Ajuste

Para definir el programa que se utilizaría para realizar la corrección por deriva y el ajuste de la red se analizaron los siguientes programas:

- GRAVNET (Drewes, 1978). Permite realizar el ajuste de las observaciones gravimétricas por mínimos cuadrados. Permite ajustar un máximo de 70 estaciones y calcular la deriva de cada gravímetro empleado en forma no lineal.
- GRADJ (Forsberg, 1981). Permite realizar el ajuste de las observaciones gravimétricas por mínimos cuadrados. Permite ajustar un número ilimitado de

observaciones de distintos gravímetros y calcular un valor de deriva lineal para cada gravímetro empleado.

El programa GRADJ ha sido utilizado para determinar numerosas redes gravimétricas en diversos países [por ejemplo (Oja, 2008)]. Además, el programa GRADJ permite ingresar una gran cantidad de observaciones normales para el ajuste por mínimos cuadrados, a diferencia del programa GRAVNET. Por otra parte, GRAVNET permite calcular una deriva no lineal para cada instrumento y circuito. Sin embargo, en el caso del programa GRADJ, la deriva se aproxima de manera lineal para cada instrumento y circuito. Es posible considerar una aproximación lineal de la deriva siempre y cuando los circuitos de medición se lleven a cabo en un corto período de tiempo. En ese sentido, para el desarrollo del presente trabajo los circuitos gravimétricos fueron observados en un tiempo inferior a doce horas cada uno.

Por lo expuesto anteriormente, el programa GRADJ fue seleccionado para llevar a cabo el ajuste por mínimos cuadrados de las observaciones realizadas con los gravímetros relativos.

3.3. Ajuste de la Red de Gravedad

Una vez reducidas todas las observaciones gravimétricas relativas debido a las mareas terrestres, las mismas fueron ajustadas como lecturas independientes mediante el método de mínimos cuadrados (Wolf & Ghilani, 2006).

Si se tienen n observaciones independientes z_1, z_2, \dots, z_n de una variable z y su valor más probable es M , entonces se puede definir el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} M - z_1 &= v_1 \\ M - z_2 &= v_2 \\ &\vdots \\ M - z_n &= v_n \end{aligned} \quad (1)$$

donde v_i representa los residuos. Si se introduce el peso p_i de cada observación realizada, el método de mínimos cuadrados permitirá hallar el valor M de manera que se cumpla la siguiente condición

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n p v_i^2 = p_1 v_1^2 + p_2 v_2^2 + \dots + p_n v_n^2 \right\} \quad (2)$$

Para los casos de grandes sistemas de ecuaciones con muchas variables y observaciones, resulta conveniente la introducción de un sistema de ecuaciones normales. En el caso específico de observaciones realizadas con gravímetros relativos se asume que las lecturas reducidas no están correlacionadas (Schüler, 1999). Las lecturas reducidas se ajustan como lecturas independientes asumiendo el siguiente modelo (Andersen & Forsberg, 1996):

$$y_k = \frac{1}{s} (g_k + a_k + b_m (t - t_0) + v_k) \quad (3)$$

donde y_k es la lectura k-ésima (ya transformada y corregida por el efecto de marea), s es el factor de escala, g_k es la gravedad de la estación k-ésima, a_k es el error del instrumento, b_m es la deriva del gravímetro m-ésimo y v_k es el residuo. a_k se asume generalmente cero (Strykowski, 2008).

La inclusión de un factor de escala en el modelo de ajuste conlleva a que el sistema de ecuaciones deje de ser lineal. A partir de los parámetros preliminares, se puede linealizar el sistema de ecuaciones alrededor de un determinado valor de referencia, obteniendo así, una expresión iterativa.

El software GRADJ permite calcular una corrección para los factores de escala de los gravímetros involucrados en caso que éstos no fueran debidamente calibrados antes de realizar las mediciones. Para el presente trabajo, dado que previo a cada campaña se realizó la correcta calibración de cada uno de los gravímetros con los que se realizaron las mediciones, el factor de escala s no fue calculado al momento de ejecutar el GRADJ. En este caso, la ecuación de observación será:

$$y_k = g_k + a_k + b_m(t - t_0) + v_k \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones de observación se tendrá la siguiente ecuación para dos observaciones dentro de un mismo circuito:

$$y_k - y_{k-1} = g_k - g_{k-1} + a_{k,k-1} + b_m(t_k - t_{k-1}) + v_{k,k-1} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (5) se puede escribir un sistema de ecuaciones de forma matricial. Si tenemos M estaciones gravimétricas y m es el gravímetro con el que se realizaron las observaciones:

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ y_{k,m} - y_{k-1,m} \\ y_{k,m+1} - y_{k-1,m+1} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \dots 0 -1 \ 1 \ 0 \dots 0 & (t_{k,m} - t_{k-1,m}) & 0 \\ 0 \dots 0 -1 \ 1 \ 0 \dots 0 & 0 & (t_{k,m+1} - t_{k-1,m+1}) \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_{k-1} \\ g_k \\ \vdots \\ g_M \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (6)$$

El sistema de ecuaciones (6) es un sistema lineal que respeta la forma (Gemael, 1994):

$$Y = AX \quad (7)$$

donde Y es el vector que involucra las observaciones realizadas, A es la matriz de coeficientes conocidos y X representa el vector de parámetros incógnita.

Si consideramos un sistema de ecuaciones en donde las observaciones tienen un cierto peso, tendremos una matriz de pesos P :

$$PY = PAX + Pv \quad (8)$$

donde P representa la matriz de pesos de las observaciones (matriz cuadrada y diagonal) y v el vector de los residuos.

Luego de normalizar las ecuaciones de observación es posible resolver el sistema de ecuaciones a partir del método de mínimos cuadrados:

$$X = (A^T PA)^{-1} A^T Py \quad (9)$$

La ventaja de utilizar las ecuaciones de observación como en la ecuación (4), es que se puede asumir que no existe ningún tipo de correlación entre las observaciones. A partir de estas ecuaciones se realizarán sucesivas iteraciones hasta que los residuos y las variaciones en los parámetros sean lo suficientemente pequeños.

Los valores de gravedad absolutos de la red RAGA también se agregan como ecuaciones independientes de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ g_{RAGA} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots \\ 0 \dots 0 \ 1 \ 0 \ 0 \dots 0 \ 0 \ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_{k-1} \\ g_k \\ \vdots \\ g_M \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

Finalmente, las ecuaciones se resuelven utilizando el método de Cholesky. Este método consiste en resolver el sistema de ecuaciones mediante la factorización de la matriz A , siendo A una matriz simétrica y definida positiva. Este método permite hallar la solución del sistema en forma rápida y eficaz.

Para el desarrollo de este trabajo, el parámetro de deriva b es asumido lineal y constante para cada circuito (siempre y cuando el período de observación del circuito sea menor a 12 horas).

Para llevar a cabo el ajuste, GRADJ asigna en primera instancia igual peso a todas las observaciones. El peso *a priori* de las observaciones es 0,02 mGal. Sin embargo, este valor varía a medida que se realizan las sucesivas iteraciones de la ecuación. Esto permite una ponderación más realista de las mediciones relativas y absolutas (los desvíos estándar *a priori* de los valores de gravedad absoluta no cambian).

Para realizar el ajuste final de la red gravimétrica, debieron eliminarse aquellas observaciones que no cumplían con las condiciones enunciadas en la Sección 2.4.

Por otra parte, aquellas observaciones cuyos residuos (luego del ajuste con GRADJ) presentaban valores altos en relación al promedio, también fueron eliminadas. Finalmente, el ajuste fue llevado a cabo mediante 2358 observaciones gravimétricas realizadas sobre 227 estaciones y 33 ecuaciones de observación correspondientes a puntos con gravedad absoluta de la red RAGA.

En cuanto al funcionamiento del GRADJ, primeramente, el programa requiere el ingreso de un archivo de texto que contenga las observaciones relativas realizadas, respetando el siguiente formato:

```
# G-673 RED GRAVIMÉTRICA NACIONAL ARGENTINA
  2 220612,      16.56      1      2026.411      0.024      2026.436 SLOR
  2 220612,      17.37      2      2026.435      0.004      2026.440 SLOR
  1 230612,      11.13      3      2759.820     -0.075      2759.745 ZOND
 18 290612,      11.02      4      2894.511     -0.010      2894.501 N155
 22 290612,      12.52      5      2822.721     -0.041      2822.679 N164
 18 290612,      13.57      6      2894.558     -0.067      2894.491 N155
```

donde:

- La primera columna corresponde al código de la estación observada;
- La segunda y tercera columna corresponden a la fecha (DDMMAA) y horario (HH.MM) de la observación respectivamente;
- La cuarta columna corresponde a la numeración de la observación;
- La quinta columna corresponde a la lectura realizada en mGal;
- La sexta columna corresponde al valor de la corrección de la marea terrestre de la estación observada en mGal;
- La séptima columna corresponde a las lecturas corregidas por el efecto de marea terrestre en mGal; y
- La última columna corresponde al nombre de la estación observada.

Por otra parte, la utilización del GRADJ requiere que el usuario defina si el programa determinará los siguientes valores:

- Diferencia máxima de tiempo entre el punto inicial y final de cada circuito gravimétrico;
- Factor de escala para cada instrumento; y
- Deriva de cada gravímetro para cada circuito.

También se deberán ingresar al programa GRADJ los valores gravimétricos de aquellos puntos cuyas gravedades sean conocidas (en este caso, los valores de la red RAGA) que serán utilizados en el ajuste:

```
1 980046.225      0.020
2 979653.626      0.020
3 980663.760      0.020
```

donde:

- La primera columna corresponde al código de la estación con gravedad conocida; y
- La segunda y tercera columna corresponden a los valores de gravedad y desvío estándar de las estaciones gravimétricas respectivamente.

La ejecución del programa GRADJ produce tres archivos de salida con los siguientes resultados:

- Archivo con gravedades y desvíos estándar de todas las estaciones ajustadas;
- Archivo con información referida al análisis de la marea terrestre; y

- Archivo con información sobre el cálculo de deriva y los residuos de todas las observaciones.

A continuación se puede observar un ejemplo del archivo que contiene las gravedades ajustadas y los desvíos estándar

```

=== Fixed stations and adjustment residuals ===
# stat  fix g  sigma  adj g  v
  1  979141.679  0.020  979141.681 -0.002 ZOND
  6  979523.523  0.020  979523.520  0.003 PAYS

=== Adjusted new gravity values and standard deviations ===
  3  979688.442  0.017  PGBA
  8  979042.608  0.020  N169

=== Statistics of adjustment ===
Adjustment observations: 2358
Stations: 262, total unknowns: 446
SIGMA (single reading at apriori weighting): 0.052
    
```

Dicho archivo se divide en tres secciones:

- En la primera sección se describen los puntos utilizados para el ajuste (en este caso serán aquellos que poseen gravedad absoluta), su valor de gravedad y desvío estándar *a priori*, y los mismos valores luego del ajuste;
- En la segunda sección se listan todas las gravedades ajustadas junto con sus desvíos estándar y el nombre de la estación;
- En la tercera sección se describe la estadística del ajuste, es decir la cantidad de observaciones y estaciones, y el SIGMA *a priori* del ajuste).

3.4. Resultados Finales

En la Tabla 3 se pueden observar los valores gravimétricos finales de los 227 puntos que componen la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden:

Tabla 3: Coordenadas y gravedades de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]	Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]
NODAL 2	-51.690778	-72.297167	981163.852	0.025	NODAL 16	-48.254917	-71.162389	980734.441	0.028
NODAL 3	-51.870056	-70.599667	981185.291	0.023	NODAL 19	-47.751639	-65.902000	980859.590	0.034
NODAL 4	-51.637278	-69.230111	981192.161	0.022	NODAL 20	-47.443556	-70.925861	980653.977	0.028
NODAL 5	-51.255778	-72.236444	981107.606	0.025	NODAL 21	-47.774778	-68.583361	980763.378	0.027
NODAL 6	-51.029667	-70.776806	981084.633	0.020	NODAL 22	-47.183889	-67.145278	980772.589	0.022
NODAL 7	-50.818889	-69.514083	981086.498	0.021	NODAL 23	-46.593556	-70.930028	980625.179	0.019
NODAL 8	-50.339167	-72.255194	981016.358	0.025	NODAL 24	-46.541250	-68.931806	980662.941	0.024
NODAL 9	-50.295250	-70.921583	980988.320	0.023	NODAL 26	-45.863500	-67.475028	980670.464	0.018
NODAL 10	-49.989194	-68.913639	981044.705	0.020	NODAL 27	-45.586694	-69.068250	980594.179	0.018
NODAL 11	-49.598778	-71.446111	980960.143	0.020	NODAL 29	-45.042472	-70.824083	980438.200	0.022
NODAL 12	-49.577944	-69.581722	980982.055	0.028	NODAL 32	-44.051889	-70.470556	980335.444	0.023
NODAL 13	-49.314000	-67.719167	981003.463	0.022	NODAL 33	-43.864556	-69.046750	980376.789	0.019
NODAL 14	-48.751028	-70.249250	980857.075	0.021	NODAL 35	-43.848361	-67.985361	980445.734	0.022
NODAL 15	-48.725278	-67.703083	980926.376	0.025	NODAL 36	-43.607111	-66.531111	980420.300	0.027
					NODAL 37	-43.300139	-65.105389	980457.954	0.017

Nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]	Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]
NODAL 40	-42.905417	-71.145583	980208.481	0.021	NODAL 100	-35.185667	-59.098083	979756.966	0.033
NODAL 41	-42.732444	-69.609361	980271.395	0.029	NODAL 101	-34.921806	-57.954528	979735.908	0.033
NODAL 42	-42.436444	-66.941500	980285.672	0.024	NODAL 103	-35.213611	-66.327611	979632.030	0.018
NODAL 43	-42.521750	-68.284972	980128.641	0.029	NODAL 104	-35.112472	-65.254722	979629.671	0.021
NODAL 44	-42.252306	-69.552306	980106.743	0.025	NODAL 105	-35.038139	-64.246361	979697.385	0.023
NODAL 46	-41.665500	-66.094389	980174.453	0.029	NODAL 106	-34.977222	-67.696778	979571.686	0.019
NODAL 47	-41.863472	-66.938111	980172.107	0.029	NODAL 107	-34.607639	-68.329417	979472.226	0.021
NODAL 48	-42.054583	-71.166111	980137.607	0.029	NODAL 108	-34.639194	-58.564861	979690.284	0.024
NODAL 49	-40.761917	-71.648056	979998.183	0.029	NODAL 109	-34.652806	-59.424750	979692.387	0.018
NODAL 50	-41.250278	-68.697944	980019.047	0.026	NODAL 110	-34.642222	-60.471806	979700.784	0.020
NODAL 51	-41.321639	-69.504222	980021.652	0.024	NODAL 111	-34.497806	-61.542750	979674.479	0.023
NODAL 52	-40.798472	-62.981194	980228.753	0.020	NODAL 112	-34.262111	-62.710361	979638.840	0.024
NODAL 54	-40.678250	-66.165861	980156.602	0.029	NODAL 114	-33.942806	-69.078583	979244.901	0.022
NODAL 55	-40.587250	-67.755694	980021.983	0.018	NODAL 116	-34.095167	-59.024417	979667.456	0.022
NODAL 56	-40.322056	-68.977139	979887.223	0.027	NODAL 117	-33.807083	-59.501917	979629.703	0.032
NODAL 57	-40.048306	-70.075306	980031.110	0.022	NODAL 119	-33.915556	-64.389639	979579.828	0.018
NODAL 58	-41.123889	-70.720306	979988.321	0.030	NODAL 120	-33.674722	-65.462111	979486.655	0.022
NODAL 59	-40.105944	-64.452694	980165.003	0.026	NODAL 121	-33.661722	-61.456556	979596.521	0.024
NODAL 61	-39.087722	-66.520889	980012.001	0.023	NODAL 122	-33.367194	-60.509583	979572.437	0.032
NODAL 62	-38.952083	-68.054083	979963.811	0.017	NODAL 123	-33.415944	-63.303083	979572.157	0.029
NODAL 63	-38.902722	-70.064389	979784.883	0.023	NODAL 124	-33.307611	-66.335333	979389.316	0.022
NODAL 64	-38.912306	-70.727444	979631.771	0.030	NODAL 126	-33.150861	-59.310889	979587.746	0.019
NODAL 65	-38.990583	-64.096111	980047.637	0.017	NODAL 127	-32.956750	-60.655667	979547.253	0.024
NODAL 66	-38.831639	-64.936056	980010.990	0.030	NODAL 128	-32.821361	-61.395250	979546.476	0.022
NODAL 67	-38.727194	-62.257917	980069.477	0.018	NODAL 129	-32.886361	-68.846556	979215.595	0.017
NODAL 68	-38.718389	-61.288389	980012.345	0.021	NODAL 131	-32.588778	-69.354611	978896.373	0.034
NODAL 69	-38.383556	-60.275250	979973.990	0.018	NODAL 132	-32.759306	-64.334306	979418.106	0.028
NODAL 70	-38.163556	-58.782389	980002.721	0.021	NODAL 133	-32.697750	-62.106056	979518.425	0.032
NODAL 71	-37.992278	-57.557861	980018.278	0.028	NODAL 134	-32.621889	-60.157889	979507.121	0.028
NODAL 74	-37.543028	-64.350083	979890.172	0.018	NODAL 135	-33.008028	-58.511556	979571.346	0.023
NODAL 75	-37.458639	-61.932556	979875.011	0.019	NODAL 136	-32.560944	-65.244278	979330.730	0.032
NODAL 76	-37.312833	-59.985000	979879.244	0.023	NODAL 137	-32.375389	-65.929833	979330.942	0.034
NODAL 77	-37.329417	-59.137333	979905.287	0.020	NODAL 138	-32.414722	-63.234444	979473.156	0.021
NODAL 78	-37.090000	-57.874944	979926.641	0.028	NODAL 139	-32.388083	-67.013250	979330.822	0.034
NODAL 79	-37.329889	-65.650028	979828.140	0.026	NODAL 140	-31.732500	-60.529444	979437.652	0.022
NODAL 80	-37.343639	-67.617250	979799.922	0.021	NODAL 141	-31.641944	-60.702222	979449.086	0.019
NODAL 81	-37.182694	-68.401194	979674.732	0.026	NODAL 142	-31.624833	-58.505417	979440.651	0.019
NODAL 82	-37.392417	-69.921528	979599.528	0.019	NODAL 144	-31.512194	-59.835000	979412.066	0.038
NODAL 83	-37.689111	-63.161111	979927.666	0.021	NODAL 145	-31.535000	-68.539250	979166.868	0.018
NODAL 84	-36.898750	-60.322583	979873.035	0.023	NODAL 146	-31.463111	-67.351111	979259.798	0.039
NODAL 86	-36.599306	-61.747389	979851.998	0.028	NODAL 148	-31.374167	-65.299722	979182.661	0.028
NODAL 87	-36.459250	-62.862917	979827.640	0.019	NODAL 150	-31.448333	-63.193889	979400.066	0.023
NODAL 89	-36.315194	-57.675389	979867.286	0.028	NODAL 151	-31.406111	-61.992222	979400.980	0.021
NODAL 90	-36.227778	-64.233750	979787.562	0.019	NODAL 152	-31.440556	-61.259444	979420.460	0.026
NODAL 91	-36.216472	-65.436528	979752.620	0.021	NODAL 153	-31.334861	-69.420667	978938.521	0.039
NODAL 92	-36.233222	-66.939139	979748.121	0.018	NODAL 154	-30.890278	-63.253056	979348.680	0.023
NODAL 93	-36.154889	-68.302944	979514.413	0.029	NODAL 155	-30.579444	-65.726306	979275.985	0.021
NODAL 94	-36.021556	-60.014833	979814.646	0.027	NODAL 156	-30.634861	-67.468083	979156.587	0.033
NODAL 95	-36.021472	-59.100028	979828.866	0.023	NODAL 157	-30.740306	-59.644194	979367.663	0.025
NODAL 97	-35.554889	-63.380083	979748.325	0.022	NODAL 158	-30.581750	-59.927889	979359.132	0.025
NODAL 98	-35.143000	-61.970000	979723.963	0.029	NODAL 159	-30.760528	-57.985528	979358.643	0.022
NODAL 99	-35.440139	-60.172194	979776.420	0.019	NODAL 160	-30.421111	-64.348889	979198.500	0.025

Nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]	Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal]	Desv. Est. [mGal]
NODAL 161	-30.385750	-58.750167	979350.424	0.028	NODAL 213	-25.332778	-59.681944	978964.122	0.020
NODAL 162	-30.311111	-61.241944	979327.638	0.018	NODAL 214	-25.286944	-57.717778	978975.504	0.029
NODAL 163	-30.241722	-68.747028	978929.928	0.029	NODAL 215	-25.720306	-61.110361	978985.519	0.029
NODAL 164	-30.154667	-66.547972	979204.233	0.035	NODAL 216	-25.161389	-61.841111	978936.298	0.027
NODAL 165	-29.906389	-63.717500	979229.206	0.025	NODAL 217	-24.551389	-59.385278	978903.564	0.029
NODAL 167	-29.317667	-68.227667	978874.727	0.025	NODAL 218	-24.430278	-63.994722	978778.465	0.026
NODAL 168	-29.295308	-67.480278	978944.708	0.029	NODAL 219	-24.375833	-65.118056	978563.303	0.019
NODAL 169	-29.413111	-66.856111	979042.606	0.020	NODAL 220	-24.372778	-66.992222	977805.198	0.040
NODAL 170	-28.853092	-66.237875	979043.833	0.024	NODAL 221	-24.254167	-61.244444	978880.072	0.032
NODAL 171	-28.932222	-65.096944	979169.328	0.033	NODAL 222	-24.216944	-66.319167	977814.193	0.037
NODAL 172	-29.128417	-60.147806	979242.269	0.029	NODAL 223	-24.184722	-62.888056	978839.218	0.033
NODAL 173	-29.144167	-59.642778	979253.075	0.022	NODAL 225	-23.868056	-60.873889	978843.390	0.029
NODAL 174	-29.143778	-59.265639	979249.654	0.022	NODAL 228	-23.610556	-62.593056	978791.607	0.029
NODAL 175	-29.185056	-58.073361	979239.086	0.020	NODAL 229	-23.328889	-64.227778	978675.122	0.019
NODAL 176	-29.178056	-56.637861	979240.089	0.020	NODAL 230	-23.185556	-62.306389	978770.321	0.033
NODAL 177	-28.753722	-68.204556	978668.084	0.039	NODAL 231	-22.512500	-63.811111	978585.039	0.030
NODAL 178	-28.629722	-63.959167	979178.780	0.028	NODAL 232	-22.272222	-62.711944	978698.021	0.033
NODAL 179	-28.603611	-62.951667	979198.233	0.026	NODAL 235	-30.713611	-62.000833	979339.569	0.030
NODAL 180	-28.667778	-61.528611	979211.613	0.030	NODAL 236	-28.392944	-57.887361	979188.496	0.025
NODAL 181	-30.322750	-69.204028	978746.264	0.039	NODAL 237	-28.137500	-58.768333	979165.440	0.017
NODAL 182	-27.980639	-55.521250	979110.722	0.019	NODAL 238	-28.550389	-56.034750	979180.550	0.020
NODAL 183	-27.954767	-65.166036	979050.627	0.023	NODAL 239	-28.286972	-56.778361	979178.998	0.025
NODAL 184	-27.783889	-64.254722	979077.425	0.029	NODAL 240	-26.711944	-58.668333	979070.793	0.026
NODAL 186	-27.649250	-67.026528	978685.651	0.023	NODAL 241	-26.714917	-54.805833	978996.600	0.022
NODAL 187	-27.583250	-66.315750	978742.400	0.030	NODAL 242	-26.255472	-53.646778	978807.611	0.024
NODAL 188	-27.576389	-60.711111	979121.921	0.019	NODAL 244	-39.951167	-71.070583	979925.882	0.031
NODAL 189	-27.654722	-59.094722	979135.261	0.029	NODAL 91 ALC	-25.488056	-64.967778	978671.006	0.034
NODAL 190	-27.450833	-58.983889	979132.806	0.020	PF1N(142)	-42.029833	-65.071444	980341.515	0.020
NODAL 192	-27.585000	-56.687361	979123.137	0.024	PF1N(219)	-44.662444	-66.596167	980485.596	0.023
NODAL 193	-27.425694	-57.338417	979126.180	0.022	PF2N(120)	-39.269361	-65.607917	980058.980	0.024
NODAL 194	-27.366250	-55.894194	979094.716	0.028	PF3N(171)	-31.332472	-66.509750	979263.790	0.033
NODAL 195	-27.644722	-62.417222	979123.657	0.020	PF3N(204)	-34.447833	-66.300556	979537.275	0.026
NODAL 196	-27.295806	-54.195917	979034.108	0.021	PF3N(259)	-33.337472	-67.958639	979410.309	0.034
NODAL 197	-26.791111	-60.440833	979059.609	0.022	PF4N(310)	-40.492444	-70.679028	980010.136	0.030
NODAL 198	-26.832917	-65.193222	978891.560	0.020	PF5N(141)	-40.745528	-65.076306	980218.072	0.018
NODAL 199	-26.692500	-66.047500	978463.015	0.030	PF11N(254)	-35.199361	-69.645500	979259.956	0.020
NODAL 200	-26.584167	-62.847222	979011.317	0.032	PF13N(89)	-32.814083	-70.048472	978643.780	0.030
NODAL 201	-26.308056	-61.655278	979021.254	0.022	PF44N(168)	-27.443889	-58.744083	979137.544	0.035
NODAL 202	-26.185000	-58.173611	979025.005	0.022	PF47N(394)	-22.750833	-65.683889	977822.284	0.038
NODAL 203	-26.393333	-64.503056	978920.777	0.034	PF64N(170)	-31.419722	-64.198611	979326.564	0.030
NODAL 204	-26.059167	-67.406389	978025.560	0.033	PF87N(143)	-38.122527	-65.967500	979925.829	0.030
NODAL 206	-25.803611	-62.830556	978965.700	0.022	PF8n(82)C	-33.575611	-59.157944	979631.925	0.030
NODAL 207	-25.597306	-54.577083	978915.714	0.020	PGBA	-34.573556	-58.519639	979688.446	0.016
NODAL 208	-25.701389	-60.196667	978989.587	0.029	SQES	-23.399194	-66.365639	977799.760	0.032
NODAL 209	-25.615000	-63.264722	978928.676	0.021	CATR	-37.872306	-67.713250	979866.116	0.018
NODAL 210	-25.484167	-64.970278	978671.221	0.019	CRES	-29.868333	-62.021111	979311.131	0.030
NODAL 211	-25.437222	-66.294444	978296.572	0.034					
NODAL 212	-25.117222	-64.124167	978836.789	0.022					

La Figura 13 muestra el histograma de los residuos obtenidos del ajuste:

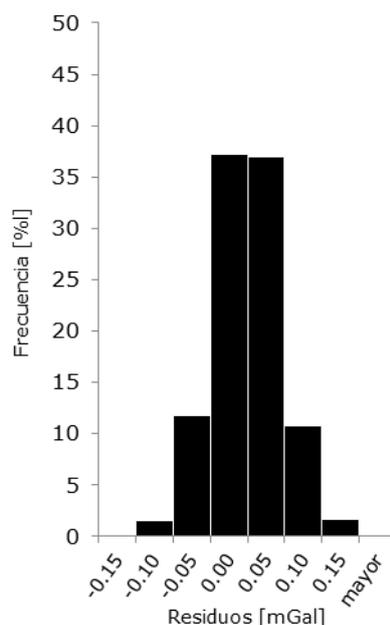


Figura 14: Histograma de residuos obtenidos del ajuste

3.5. Análisis de los Resultados

La Tabla 4 muestra los valores estadísticos que surgen del ajuste por mínimos cuadrados de las observaciones gravimétricas. El desvío estándar promedio de los 227 nuevos valores hallados es igual a 0,025 mGal, mientras que el desvío estándar máximo alcanza los 0,040 mGal. Estos valores son notablemente inferiores a los desvíos estándar de las gravedades de la antigua red gravimétrica BACARA.

Tabla 4: Estadísticas de los resultados obtenidos

Desvío Estándar Máximo [mGal]	Desvío Estándar Mínimo [mGal]	Desvío Estándar Promedio [mGal]
0.040	0.016	0.025

Por otra parte, la exactitud obtenida para los nuevos valores gravimétricos pone de manifiesto que se ha logrado cumplir con el objetivo principal del presente trabajo, es decir, determinar una nueva red gravimétrica precisa de primer orden que reemplace a la antigua red BACARA.

En la Tabla 5 se puede observar la diferencia entre las gravedades históricas determinadas en el sistema IGSN71 y los nuevos valores que surgen del ajuste de la Red Gravimétrica de Primer Orden.

Tabla 5: Diferencias entre los valores de gravedad históricos y los que surgen de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden

Nombre	Diferencia [mGal]						
NODAL 2	-0.572	NODAL 4	-0.471	NODAL 6	-0.433	NODAL 8	-0.378
NODAL 3	-0.511	NODAL 5	-0.636	NODAL 7	-0.378	NODAL 9	-0.390

Nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina

Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]
NODAL 10	-0.415	NODAL 67	-0.027	NODAL 170	0.087	NODAL 120	0.075
NODAL 11	-0.423	NODAL 68	-0.245	NODAL 171	0.112	NODAL 172	-0.059
NODAL 12	-0.365	NODAL 121	-0.081	NODAL 69	0.160	NODAL 173	-0.505
NODAL 13	-0.593	NODAL 122	-0.287	NODAL 70	0.069	NODAL 174	-0.424
NODAL 14	-0.525	NODAL 123	0.043	NODAL 71	0.262	NODAL 175	-3.666
NODAL 15	-0.766	NODAL 124	-0.466	NODAL 74	0.618	NODAL 176	0.731
NODAL 16	-0.551	NODAL 126	-0.136	NODAL 75	0.569	NODAL 177	-1.094
NODAL 19	-0.690	NODAL 127	-0.293	NODAL 76	0.216	NODAL 178	-1.460
NODAL 20	-0.617	NODAL 128	-0.276	NODAL 77	0.123	NODAL 179	-0.253
NODAL 21	-0.888	NODAL 129	-0.235	NODAL 78	0.159	NODAL 180	-0.053
NODAL 22	-0.629	NODAL 131	-0.643	NODAL 79	0.420	NODAL 181	-0.424
NODAL 23	-0.489	NODAL 132	-0.796	NODAL 80	1.098	NODAL 182	-0.212
NODAL 24	-0.371	NODAL 133	-0.345	NODAL 81	-0.432	NODAL 183	0.003
NODAL 26	1.326	NODAL 134	-0.931	NODAL 82	-0.108	NODAL 184	0.045
NODAL 27	-3.069	NODAL 135	-0.196	NODAL 83	0.924	NODAL 186	-0.711
NODAL 29	-1.120	NODAL 136	-1.740	NODAL 84	-0.095	NODAL 187	-1.030
NODAL 32	0.016	NODAL 137	-0.652	NODAL 86	0.562	NODAL 188	-0.151
NODAL 33	-0.769	NODAL 138	-0.196	NODAL 87	0.760	NODAL 189	-0.051
NODAL 35		NODAL 139	-0.242	NODAL 89	0.224	NODAL 190	-0.016
NODAL 36	-0.050	NODAL 140	-0.852	NODAL 90	0.498	NODAL 192	-0.317
NODAL 37	-0.164	NODAL 141	-0.376	NODAL 91	0.250	NODAL 193	-0.140
NODAL 40	-0.441	NODAL 142	0.049	NODAL 91 ALC		NODAL 194	-0.326
NODAL 41	-0.695	NODAL 144	-0.406	NODAL 92	-0.011	NODAL 195	-0.107
NODAL 42	-0.482	NODAL 145	-0.458	NODAL 93	-0.313	NODAL 196	-0.218
NODAL 43	-0.321	NODAL 146	-0.358	NODAL 94	0.014	NODAL 197	-0.079
NODAL 44	-0.673	NODAL 148	-1.641	NODAL 95	0.134	NODAL 198	0.110
NODAL 46	-0.353	NODAL 150	-0.576	NODAL 97	0.575	NODAL 199	-0.395
NODAL 47	-0.267	NODAL 151	-0.730	NODAL 98	0.357	NODAL 200	-0.157
NODAL 48	-0.497	NODAL 152	-0.690	NODAL 99	0.060	NODAL 201	-0.134
NODAL 49	2.917	NODAL 153	-0.661	NODAL 100	0.264	NODAL 202	-0.105
NODAL 50	0.073	NODAL 154	-0.660	NODAL 101	0.232	NODAL 203	-1.187
NODAL 51	0.058	NODAL 155	-0.195	NODAL 103	-0.310	NODAL 204	-1.230
NODAL 52	-0.013	NODAL 156	-0.267	NODAL 104	-0.171	NODAL 206	-0.120
NODAL 54	16.208	NODAL 157	-0.433	NODAL 105	0.045	NODAL 207	-0.144
NODAL 55	0.057	NODAL 158	-0.642	NODAL 106	-0.286	NODAL 208	-0.147
NODAL 56	-0.833	NODAL 159	0.257	NODAL 107	-0.436	NODAL 209	-0.596
NODAL 57	-0.330	NODAL 160	-1.120	NODAL 108	0.126	NODAL 210	-0.251
NODAL 58	0.429	NODAL 161	-0.164	NODAL 109	0.033	NODAL 211	-0.332
NODAL 59	-0.073	NODAL 162	-0.148	NODAL 110	0.066	NODAL 212	-0.219
NODAL 61	1.289	NODAL 163	-0.448	NODAL 111	0.071	NODAL 213	-0.102
NODAL 62	2.279	NODAL 164	-0.033	NODAL 112	0.050	NODAL 214	-0.184
NODAL 63	-0.263	NODAL 165	-1.416	NODAL 114	-0.241	NODAL 215	-0.139
NODAL 64	25.529	NODAL 167	-0.207	NODAL 116	-0.106	NODAL 216	0.012
NODAL 65	0.383	NODAL 168	-0.938	NODAL 117	0.147	NODAL 217	-0.054
NODAL 66	0.860	NODAL 169	0.104	NODAL 119	-0.058	NODAL 218	-0.505

Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]
NODAL 219	-0.303	NODAL 232	0.059	PF11N(254)	-0.366	PF4N(310)	-10.836
NODAL 220	0.002	NODAL 235	-4.309	PF13N(89)	-1.350	PF5N(141)	-0.442
NODAL 221	-0.122	NODAL 236	2.064	PF1N(142)	-0.465	PF64N(170)	1.136
NODAL 222	0.007	NODAL 237	-0.170	PF1N(219)	0.174	PF87N(143)	
NODAL 223	-0.148	NODAL 238	0.470	PF2N(120)	1.390	PF8n(82)C	
NODAL 225	-0.120	NODAL 239	-2.288	PF3N(171)	-0.350	SQES	
NODAL 228	-0.047	NODAL 240	-0.343	PF3N(204)	-0.495	PGBA	
NODAL 229	-0.052	NODAL 241	-0.330	PF3N(259)	-0.339	CATR	
NODAL 230	-0.001	NODAL 242	-0.221	PF44N(168)	-0.264	CRES	
NODAL 231	-0.349	NODAL 244	31.418	PF47N(394)			

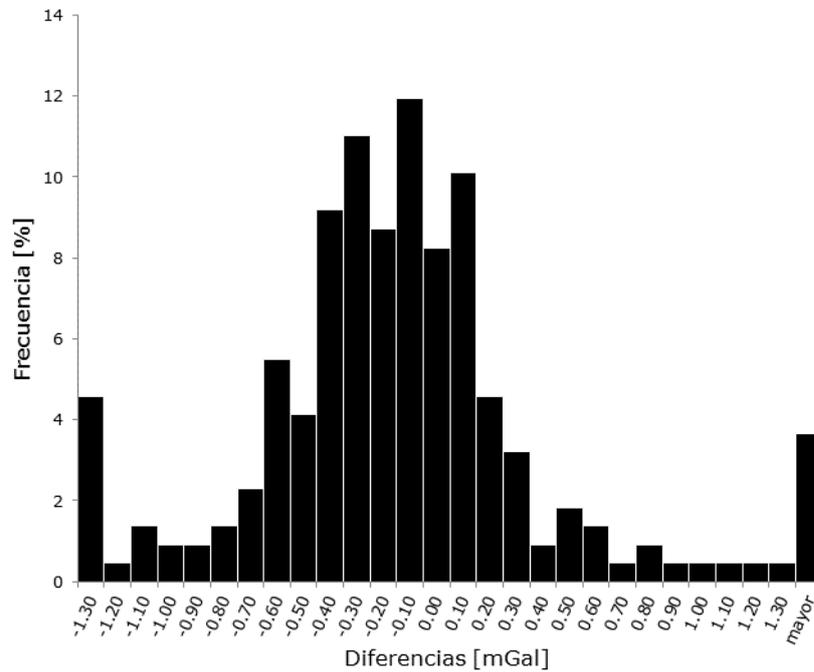


Figura 15: Histograma de las diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas

Se pudieron calcular diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas de 219 puntos. El promedio de dichas diferencias es igual a 0,08 mGal, alcanzando un máximo igual a 31,42 mGal y un mínimo igual a -10,84 mGal. Por otra parte, existen 5 puntos cuyas diferencias que superan los 4 mGal [nodaless 54, 64, 235 y 244, y PF4N(310)] que corresponden a equivocaciones en los valores históricos de la gravedad que se han hallado gracias a la determinación de la nueva red de gravedad.

4. Conclusiones

Las observaciones gravimétricas llevadas a cabo por el IGN entre los años 2012 y 2015 permitieron determinar una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina (RPO-Ar) que reemplaza a la antigua red BACARA.

El procesamiento de dichas mediciones permitió determinar el valor de la aceleración de la gravedad sobre 227 puntos homogéneamente distribuidos sobre el Territorio Nacional con un desvío estándar promedio de 0,026 mGal y un desvío estándar máximo de 0,040 mGal.

La reducción de las observaciones gravimétricas debido al efecto de las mareas terrestres se llevó a cabo mediante el modelo teórico propuesto por Cartwright y Edden (1973) utilizando el software GRAVDATA. Por otra parte, el ajuste de la nueva red gravimétrica fue obtenido mediante el método de mínimos cuadrados, utilizando los valores de gravedad de la red RAGA como puntos de referencia y el programa GRADJ.

Esta nueva red forma parte de la infraestructura geodésica básica que define el Marco de Referencia Gravimétrico Nacional y como tal contribuye: a la determinación de alturas físicas (ortométricas, normales, etc.), a la definición de modelos de geoide nacionales y regionales, al proceso de prospección de hidrocarburos y otros minerales, al conocimiento sobre la distribución y composición de las masas en el interior de la Tierra, y a la detección de estructuras geológicas dentro de la corteza terrestre.

Anexo I – Marea Terrestre y Deriva Instrumental

Existen ciertas consideraciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora del procesamiento de mediciones gravimétricas. Una vez hecha la medición, se debe tener en cuenta que el valor dado está alterado principalmente por dos efectos. Uno de estos efectos está asociado a la atracción gravitatoria de otros cuerpos celestes, llamado Marea. El otro, llamado Deriva o Drift, está asociado a un error sistemático producido por el propio desgaste del instrumento con el que se está realizando la medición. Este error es propio de cada gravímetro y no es posible predecirlo.

1.1. Marea Terrestre

El efecto de marea terrestre debido a la atracción de los cuerpos celestes que rodean a la Tierra, produce importantes alteraciones en la distribución de masas de la Tierra, además de alterar tanto la rotación como la traslación de la Tierra. Se considera como componente principal del efecto de marea, el efecto luni-solar, debido a la atracción gravitatoria del Sol y la Luna.

Este efecto se modela con distintos grados de aproximación. Estos modelos consisten en aproximaciones utilizando armónicos esféricos. Entre los modelos más importantes cabe mencionar a los siguientes:

- Ecuaciones de Longman: no utiliza armónicos esféricos, sino que es la aproximación más sencilla y menos precisa;
- Aproximación de Doodson: utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 378;
- Aproximación de Cartwright: utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 505;
- Aproximación de Büellesfeld: utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 665; y
- Aproximación de Tamura: utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 1200, éste uno de los más precisos.

1.2. Deriva Instrumental

La deriva del gravímetro está asociada al desgaste propio de cada instrumento y en algunos otros factores (tales como el desgaste del sistema de resortes y palancas, pequeñas variaciones en la temperatura de operación del equipo, etc.). El paso del tiempo produce un desgaste en el instrumento, principalmente en su resorte y las fibras de torsión. La temperatura y las circunstancias en las que se encuentra el gravímetro también afectan a la medición. Este efecto genera pequeñas variaciones del orden de 0,01 mGal en las lecturas realizadas con el instrumental.

Una forma de corregir este efecto es realizar sucesivas mediciones sobre una misma estación (usualmente denominada "estación base") en intervalos de tiempo parecidos. En ese sentido, las distintas mediciones llevadas a cabo en la estación base se pueden graficar en un diagrama con ejes cartesianos, cuyas abscisas corresponderían al tiempo transcurrido para cada observación y cuyas ordenadas corresponderían al valor de gravedad obtenido. A partir de este gráfico, es posible determinar la pendiente de la recta que une los puntos, resultando éste valor la deriva del gravímetro. Finalmente, se asume que el valor de deriva (o pendiente) hallado afecta a todas las observaciones realizadas en el intervalo de tiempo transcurrido entre observaciones llevadas a cabo en la estación base.

El principio de este procedimiento es llevar todas las observaciones realizadas en campo a un tiempo "cero", simulando de esta forma que todas las mediciones han sido realizadas en el mismo instante de tiempo (Seigel, 1995).

Anexo II – Tablas de Conversión de Lecturas

1.1. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-043

0	0.00	1.04600	3600	3764.45	1.04700
100	104.60	1.04580	3700	3869.15	1.04710
200	209.18	1.04560	3800	3973.86	1.04715
300	313.74	1.04535	3900	4078.58	1.04725
400	418.28	1.04510	4000	4183.30	1.04725
500	522.79	1.04470	4100	4288.03	1.04725
600	627.26	1.04455	4200	4392.75	1.04715
700	731.71	1.04465	4300	4497.47	1.04715
800	836.18	1.04530	4400	4602.19	1.04720
900	940.71	1.04525	4500	4706.90	1.04735
1000	1045.23	1.04520	4600	4811.64	1.04765
1100	1149.75	1.04515	4700	4916.40	1.04775
1200	1254.27	1.04515	4800	5021.18	1.04780
1300	1358.78	1.04515	4900	5125.96	1.04780
1400	1463.29	1.04525	5000	5230.74	1.04770
1500	1567.82	1.04535	5100	5335.51	1.04765
1600	1672.35	1.04545	5200	5440.28	1.04760
1700	1776.90	1.04550	5300	5545.04	1.04760
1800	1881.45	1.04555	5400	5649.80	1.04760
1900	1986.00	1.04560	5500	5754.56	1.04770
2000	2090.56	1.04560	5600	5859.33	1.04780
2100	2195.12	1.04565	5700	5964.11	1.04780
2200	2299.69	1.04575	5800	6068.89	1.04780
2300	2404.26	1.04580	5900	6173.67	1.04775
2400	2508.84	1.04585	6000	6278.45	1.04775
2500	2613.43	1.04590	6100	6383.22	1.04765
2600	2718.02	1.04600	6200	6487.99	1.04760
2700	2822.61	1.04605	6300	6592.75	1.04745
2800	2927.22	1.04615	6400	6697.49	1.04725
2900	3031.83	1.04625	6500	6802.22	1.04705
3000	3136.46	1.04635	6600	6906.92	1.04680
3100	3241.10	1.04650	6700	7011.60	1.04655
3200	3345.75	1.04660	6800	7116.26	1.04625
3300	3450.41	1.04670	6900	7220.88	1.04600
3400	3555.08	1.04685	7000	7325.48	
3500	3659.76	1.04695			

1.2. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-069

0	0.00	1.02935	3600	3708.20	1.03185
100	102.94	1.02932	3700	3811.38	1.03207
200	205.87	1.02930	3800	3914.59	1.03233
300	308.80	1.02927	3900	4017.82	1.03254
400	411.72	1.02925	4000	4121.08	1.03272
500	514.65	1.02925	4100	4224.35	1.03284
600	617.57	1.02923	4200	4327.63	1.03294
700	720.50	1.02921	4300	4430.93	1.03302
800	823.42	1.02922	4400	4534.23	1.03307
900	926.34	1.02922	4500	4637.53	1.03307
1000	1029.26	1.02923	4600	4740.84	1.03307
1100	1132.19	1.02925	4700	4844.15	1.03313
1200	1235.11	1.02928	4800	4947.46	1.03323
1300	1338.04	1.02933	4900	5050.78	1.03339
1400	1440.97	1.02938	5000	5154.12	1.03350
1500	1543.91	1.02945	5100	5257.47	1.03357
1600	1646.85	1.02956	5200	5360.83	1.03359
1700	1749.81	1.02971	5300	5464.19	1.03357
1800	1852.78	1.02985	5400	5567.55	1.03353
1900	1955.77	1.02995	5500	5670.90	1.03345
2000	2058.76	1.03000	5600	5774.24	1.03334
2100	2161.76	1.03001	5700	5877.58	1.03319
2200	2264.76	1.03005	5800	5980.90	1.03307
2300	2367.77	1.03012	5900	6084.20	1.03302
2400	2470.78	1.03024	6000	6187.51	1.03299
2500	2573.80	1.03039	6100	6290.81	1.03290
2600	2676.84	1.03057	6200	6394.10	1.03277
2700	2779.90	1.03079	6300	6497.37	1.03261
2800	2882.98	1.03105	6400	6600.63	1.03242
2900	2986.08	1.03127	6500	6703.88	1.03220
3000	3089.21	1.03143	6600	6807.10	1.03197
3100	3192.35	1.03153	6700	6910.29	1.03170
3200	3295.51	1.03163	6800	7013.46	1.03140
3300	3398.67	1.03170	6900	7116.60	1.03110
3400	3501.84	1.03177	7000	7219.71	
3500	3605.02	1.03180			

1.3. Gravímetro Lacoste & Romberg™ G-673

0	0.00	1.02235	4200	4287.03	1.02129
100	102.24	1.02208	4300	4389.15	1.02136
200	204.44	1.02186	4400	4491.29	1.02141
300	306.68	1.02167	4500	4593.43	1.02145
400	408.80	1.02147	4600	4695.58	1.02143
500	510.94	1.02129	4700	4797.72	1.02152
600	613.97	1.02112	4800	4899.88	1.02153
700	715.12	1.02098	4900	5002.03	1.02154
800	817.22	1.02084	5000	5104.18	1.02156
900	919.37	1.02070	5100	5206.34	1.02156
1000	1021.44	1.02056	5200	5308.50	1.02154
1100	1123.49	1.02044	5300	5410.65	1.02152
1200	1225.54	1.02035	5400	5512.80	1.02149
1300	1327.57	1.02022	5500	5614.95	1.02147
1400	1429.60	1.02024	5600	5717.10	1.02142
1500	1531.62	1.02020	5700	5819.24	1.02137
1600	1633.64	1.02018	5800	5921.38	1.02137
1700	1735.66	1.02017	5900	6023.51	1.02129
1800	1837.68	1.02017	6000	6125.63	1.02122
1900	1939.70	1.02017	6100	6227.74	1.02113
2000	2041.71	1.02018	6200	6329.84	1.02103
2100	2143.73	1.02018	6300	6431.93	1.02090
2200	2245.75	1.02017	6400	6534.01	1.02077
2300	2347.77	1.02018	6500	6636.07	1.02063
2400	2449.76	1.02020	6600	6738.12	1.02048
2500	2555.18	1.02022	6700	6840.15	1.02032
2600	2653.83	1.02027	6800	6942.17	1.02017
2700	2755.85	1.02031	6900	7044.17	1.02000
2800	2857.88	1.02037	7000	7146.15	1.01988
2900	2959.92	1.02042			
3000	3061.06	1.02050			
3100	3164.01	1.02057			
3200	3266.07	1.02065			
3300	3368.13	1.02072			
3400	3470.21	1.02078			
3500	3572.28	1.02085			
3600	3674.37	1.02092			
3700	3776.46	1.02101			
3800	3878.56	1.02107			
3900	3980.67	1.02113			
4000	4082.78	1.02119			
4100	4184.90	1.02124			

Referencias

- Antokoletz, E., Tocho, C., Piñón, D. A., Miranda, S., Lauría, E. A., Pacino, M. C., & Cimbaro, S. R. (2014). *Comparación de modelos de mareas terrestres con grupos de onda teóricos y calculados*. Paper presented at the Reunión SIRGAS 2014, La Paz, Bolivia.
- Bonvalot, S., Diament, M., & Gabalda, G. (1998). Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophysical Journal International*, 135(2), 470-494.
- Büllesfeld, F.-J. (1985). Ein Beitrag zur harmonischen Darstellung des gezeitenerzeugenden Potentials. *Deutsche Geodaetische Kommission Bayer. Akad. Wiss.*, 314.
- Cartwright, D., & Edden, A. C. (1973). Corrected tables of tidal harmonics. *Geophysical Journal International*, 33(3), 253-264.
- Cartwright, D., & Tayler, R. (1971). New computations of the tide-generating potential. *Geophysical Journal International*, 23(1), 45-73.
- Doodson, A. T. (1921). The harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 305-329.
- Drewes, H. (1978). Zur Ausgleichung von Gravimeternetzen. *ZfV*, 103(10), 485-496.
- Fett, J. (1992). Instructional manual: Model G and D gravity meters. LaCoste and Romberg Gravity Meters. Inc, Austin, 127.
- Forsberg, R. (1981). Establishment of a LaCoste & Romberg Gravity Network in Greenland. *Bulletin de Bureau Gravimetrique International*, 46, 168-179.
- Gemael, C. (1994). *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*: Editora UFPr.
- Instituto Geográfico Militar. (1970). *Informe nacional de actividades gravimétricas para el período 1965-1970*. Paper presented at the VI Reunión de la Comisión Gravimétrica Internacional de la Asociación Internacional de Geodesia, París, Francia.
- Instituto Geográfico Militar. (1971). *Informe nacional de actividades*. Paper presented at the XV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Moscú, URSS.
- Lauría, E. A., Pacino, M. C., Blitzkow, D., Cimbaro, S. R., Piñón, D. A., Miranda, S., . . . Tocho, C. (2015). *Argentine Absolute Gravity Network (AAGN)*. Paper presented at the 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Prague, Czech Republic.
- Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355.
- Moirano, J., Brunini, C., Font, G., Lauria, E., & Ramos, R. (2002). Hacia una nueva referencia vertical en Argentina. *Actas XXI Reunión Científica de Geofísica y Geodesia. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Rosario. Argentina*.
- Morelli, C., Gantar, C., McConnell, R., Szabo, B., & Uotila, U. (1972). The international gravity standardization net 1971 (IGSN 71): DTIC Document.
- Oja, T. (2008). *New solution for the Estonian gravity network GV-EST95*. Paper presented at the The 7th International Conference “Environmental Engineering” Selected Papers.
- Piñón, D. A., Guagni, H. J., & Cimbaro, S. R. (2014). *Nuevo ajuste de la red de nivelación de alta precisión de la República Argentina*. Paper presented at the

- XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, San Juan.
- Scintrex Limited. (2009). CG5 Scintrex autograv system Operation Manual (pp. 311). Canada, Ontario: Scintrex Limited.
- Schüler, T. (1999). Introduction to Gravimetry: Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. *A brief tutorial. Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich.*
- Seigel, H. O. (1995). High precision gravity guide. Canada: Scintrex Limited.
- Strykowski, G. (2008). Gravity adjustment. Retrieved Dec, 2015, from http://cct.gfy.ku.dk/gravity_adjustment_2008_final.pdf
- Tamura, Y. (1987). A harmonic development of the tide-generating potential. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 99, 6813-6855.
- Torge, W. (1989). Gravimetry (pp. 465): Walter de Gruyter, Berlin.
- Torge, W., Timmen, L., Röder, R. H., & Schnüll, M. (1995). Large Scale Absolute Gravity Control in South America—JILAG-3 Campaigns 1988–1991— *Gravity and Geoid* (pp. 46-55): Springer.
- Wolf, P., & Ghilani, C. (2006). Adjustment Computations Spatial Data Analysis: Hoboken.