



Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

**“Red Gravimétrica de Primer Orden de  
la República Argentina”**

**Autor:** Ezequiel D. Antokoletz

**Directora:** Dra. Claudia N. Tocho

**Co-Director:** MSc. Agrim. Diego A. Piñón

La Plata  
31 de marzo de 2017



La Nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina fue un proyecto generado a partir de la necesidad de actualizar y mejorar el Marco Gravimétrico Nacional. Para tal fin, con la colaboración de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), la Universidad Nacional de Rosario (UNR) y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), el Instituto Geográfico Nacional (IGN) materializó esta nueva red homogénea y cuyos desvíos estándar son menores a 0.05 mGal.

El presente trabajo de tesis surgió a raíz de un convenio de pasantías educativas firmado entre el Instituto Geográfico Nacional y la Universidad Nacional de La Plata, en particular, con la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG). Dicho convenio tuvo como objetivo principal el diseño, cálculo y determinación del Marco Gravimétrico Nacional.

El procesamiento y ajuste de la Nueva Red Gravimétrica de la República Argentina fue realizado por el alumno Ezequiel D. Antokoletz, bajo la dirección de Claudia N. Tocho (FCAG, UNLP) y Diego A. Piñón (IGN), en el marco de una pasantía educativa iniciada en octubre del año 2013 y finalizada en el mes de junio del año 2015.

## Agradecimientos

...a mis viejos y a mi hermano, a quienes está dedicado principalmente este trabajo, por acompañarme, guiarme, aconsejarme y ayudarme. Por sus enseñanzas, su apoyo y su amor incondicional toda la vida. No podría haberlo logrado sin ustedes.

...a Maqui, por aguantarme y llenarme de fuerza para seguir adelante, siempre con una sonrisa y un cariño enorme.

...a Claudia, por apostar siempre por mí, por ser una docente y una guía sin igual.

...a mis amigos y amigas, Fede, el Gordo (mis primeros compañeros platenses), Tomi, Mauro, Tincho, Kei, Caro, Santi H., Iri, Belu, Vicky y tantos otros que olvido, a quienes les debo tantas risas, charlas y aprendizajes.

...a mis compañeros de oficina y amigos también, Henry, Gonza, Santi, Diego, Dani, Tomi y los demás, por todo ese tiempo de trabajo compartido, siempre riendo y aprendiendo.

...a los chicos de INTI, con quienes crecí tanto, por las risas, luchas y marchas vividas.

...a la Facultad y a la Universidad, por brindarme un espacio tan maravilloso para formarme.

Todos ustedes me definieron a lo largo de este camino.

**¡Gracias infinitas!**

## Resumen

La Gravimetría es la disciplina encargada de medir la aceleración de la gravedad sobre (o cerca) de la superficie de la Tierra, y estudiar el campo gravitatorio que ésta genera. Las Redes Gravimétricas son redes de puntos en los que se conoce el valor de la aceleración de la gravedad. Estas redes son útiles para la determinación de un geoide gravimétrico, la determinación de alturas físicas, la búsqueda de recursos naturales, entre otras.

En el año 2012, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), la Universidad Nacional de Rosario (UNR) y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) iniciaron un proyecto conjunto con el propósito de materializar una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden que permita actualizar y mejorar el Marco Gravimétrico Nacional. Esta nueva red cuenta con 227 puntos distribuidos homogéneamente en todo el territorio nacional y que coinciden, en su mayoría, con los Nodales de la Red de Nivelación de Alta Precisión.

En este trabajo se presenta el control, procesamiento y ajuste de las mediciones gravimétricas realizadas entre los años 2012 y 2015. Las mismas fueron procesadas y ajustadas a la Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA) utilizando los programas GRAVDATA (Drewes, 1978) y GRADJ (Andersen y Forsberg, 1996), respectivamente. El cálculo de la corrección de marea se llevó a cabo utilizando el modelo propuesto por Cartwright y Edden (1973), el cual aproxima el potencial de marea terrestre con un desarrollo en armónicos esféricos de 505 coeficientes. Los valores de gravedad finales surgen de un ajuste por mínimos cuadrados, considerando los valores de deriva y las precisiones de las lecturas.

Como resultado de dicho ajuste se obtuvieron los valores de aceleración de gravedad para 227 puntos distribuidos en toda la República Argentina. Los desvíos estándar resultan, en todos los casos, menores a 0.040 mGal. Destacando la distribución de puntos y los resultados obtenidos, se concluyó que se ha logrado obtener una nueva red actualizada y considerablemente más homogénea que la antigua red de primer orden, BACARA, que contaba con un total de 86 puntos y desvíos estándar del orden de 0.085 mGal.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Motivación y objetivos . . . . .	10
1.2. Estructura del Trabajo de Tesis . . . . .	11
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>12</b>
2.1. La Gravimetría . . . . .	12
2.2. Métodos de Medición de la Gravedad . . . . .	14
2.2.1. Medición Absoluta de la Gravedad . . . . .	15
2.2.2. Medición Relativa de la Gravedad . . . . .	15
2.3. Marea Terrestre y Deriva Instrumental . . . . .	18
2.3.1. Marea Terrestre . . . . .	19
2.3.2. Deriva Instrumental . . . . .	23
<b>3. Sistemas de referencia gravimétricos</b>	<b>24</b>
3.1. Sistema gravimétrico Potsdam . . . . .	24
3.2. Red de Estandarización Gravimétrica Internacional (IGSN71) . . . . .	25
3.3. Base de Calibración de la República Argentina (BACARA) . . . . .	25
3.4. Primera Red Gravimétrica Absoluta . . . . .	28
3.5. Red Argentina de Gravedad Absoluta (RAGA) . . . . .	30
3.6. Red Gravimétrica de Segundo Orden (RSO-Ar) . . . . .	32
<b>4. Medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina (RPO-Ar)</b>	<b>34</b>
4.1. Planificación de campañas gravimétricas . . . . .	34
4.2. Medición de la Red . . . . .	36
4.3. Instrumental Utilizado . . . . .	39
4.3.1. Gravímetro LaCoste & Romberg <sup>TM</sup> . . . . .	39
4.3.2. Gravímetro Scintrex <sup>TM</sup> Autograv CG-5 . . . . .	40
4.4. Control de Lecturas Observadas . . . . .	40
<b>5. Procesamiento, Análisis y Ajuste de las Observaciones</b>	<b>42</b>
5.1. Análisis y selección de programas de procesamiento . . . . .	42
5.2. Análisis y Selección de Programas de Ajuste . . . . .	43
5.3. Ajuste de la Red de Gravedad . . . . .	43
5.3.1. Criterio de Selección de Puntos de Referencia . . . . .	48

<b>6. Resultados Finales y Análisis</b>	<b>50</b>
6.1. Resultados Finales . . . . .	50
6.2. Análisis de los Resultados . . . . .	56
6.2.1. Consistencia de la RPO-Ar . . . . .	56
6.2.2. Comparación con Antiguos Valores de Gravedad . . . . .	59
<b>7. Conclusiones</b>	<b>64</b>

# Índice de figuras

2.1. Aceleración gravitacional y aceleración centrífuga . . . . .	13
2.2. Método caída libre . . . . .	15
2.3. Resorte Estático . . . . .	16
2.4. Sensibilidad resorte estático . . . . .	17
2.5. Resorte Astático . . . . .	18
2.6. Marea terrestre . . . . .	19
2.7. Análisis de la fuerza de marea . . . . .	20
2.8. Relación de $\varphi$ con las coordenadas geográficas del punto P y la posición de la Luna . . . . .	21
3.1. Red IGSN71 . . . . .	25
3.2. Red BACARA . . . . .	27
3.3. Primera Red Gravimétrica Absoluta . . . . .	29
3.4. Red RAGA . . . . .	30
3.5. Distribución de los puntos de la RSO-Ar . . . . .	33
4.1. Planificación de la medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden . . . . .	35
4.2. Método de medición sin reobservación . . . . .	36
4.3. Método de ida y vuelta . . . . .	36
4.4. Ajuste de la RPO-Ar . . . . .	38
4.5. Gravímetro Lacoste & Romberg <sup>TM</sup> . . . . .	39
4.6. Gravímetro Scintrex <sup>TM</sup> Autograv CG-5 . . . . .	40
6.1. Histograma de residuos obtenidos del ajuste . . . . .	55
6.2. Estadística de cada experimento . . . . .	58
6.3. Histograma de las diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas . . . . .	63



# Índice de tablas

3.1. Coordenadas y gravedades de la Primer Red Gravimétrica Absoluta . . . . .	28
3.2. Coordenadas y gravedades de la red RAGA . . . . .	31
3.3. Diferencias de la red RAGA con la antigua Red Absoluta . . . . .	32
5.1. Diferencias de los puntos SALU y VCMK entre gravedades RAGA y ajustadas .	48
6.1. Coordenadas y gravedades de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden . . .	50
6.2. Estadísticas de los resultados obtenidos . . . . .	56
6.3. Diferencias entre gravedad absoluta (RAGA) y la gravedad ajustada para cada experimento . . . . .	57
6.4. Estadística de los resultados obtenidos de los dos experimentos . . . . .	59
6.5. Diferencias entre los valores de gravedad históricos y los que surgen de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden . . . . .	60

# Capítulo 1

## Introducción

En el presente capítulo se detalla cuál ha sido la motivación de este trabajo y se comentan los objetivos que se pretenden lograr. Por otra parte, se comenta la estructura del trabajo de tesis con el fin de facilitar su lectura.

### 1.1. Motivación y objetivos

A fines del año 2011, en el marco de una reunión técnica organizada por el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Internacional de Geofísicos y Geodestas (CNUGGI) celebrada en la ciudad de Rosario, se manifestó la necesidad de materializar una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden. En ese sentido, en el año 2012, el Instituto Geográfico Nacional (IGN), la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), la Universidad Nacional de Rosario (UNR) y la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) iniciaron un proyecto conjunto con el fin de materializar una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden cuyos puntos estuviesen distribuidos de manera homogénea en todo el territorio nacional, que sus desvíos estándar estuvieran por debajo de 0.050 mGal y que permitiera actualizar la antigua red BACARA (BAse de CALibración de la República Argentina) dado que gran parte de los puntos que la componen fueron destruidos.

Este proyecto tenía como objetivos principales:

- Materializar una nueva red gravimétrica de primer orden compuesta por puntos altimétricos distribuidos en forma homogénea sobre el territorio nacional;
- Asegurar que el desvío estándar de las gravedades 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 República Argentina y América del Sur.

Por otra parte, la materialización de la red RAGA (Red Argentina de Gravedad Absoluta) durante el año 2014 permite lograr un ajuste óptimo en términos de mínimos cuadrados (Wolf y Ghilani, 2006). Además, la adquisición de nuevo instrumental gravimétrico con mayor precisión posibilita realizar mediciones precisas. Todo esto se conjuga para brindar la motivación para llevar a cabo este trabajo.

Finalmente, el objetivo específico del presente trabajo de tesis es realizar el procesamiento y ajuste de las observaciones con el fin de obtener valores de gravedad para el conjunto de puntos que conforman la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden de la República Argentina y cuyos desvíos estándar sean menores o iguales a 0.050 mGal.

Para cumplir dicho objetivo primeramente se realizó un control de las observaciones con el fin de eliminar posibles errores de observación. El procesamiento de las observaciones consistió en la transformación de las lecturas a unidades de gravedad y la aplicación de la corrección de mareas. Por último, el ajuste se hizo utilizando el método de mínimos cuadrados resolviendo el efecto de deriva instrumental como una incógnita adicional para cada gravímetro.

Existen en la actualidad diversos programas computacionales que permiten realizar el procesamiento y ajuste de observaciones gravimétricas. Algunos de éstos han sido analizados con la finalidad de seleccionar aquellos que permitan cumplir los objetivos antes mencionados y que respeten estándares internacionales, tales como los planteados en la Resolución N°16 del año 1983 de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG).

## 1.2. Estructura del Trabajo de Tesis

A continuación se describe brevemente el contenido de los capítulos que componen el presente trabajo de tesis con el fin de facilitar su lectura:

En el Capítulo 2 se desarrolla el Marco Teórico, abordando los conceptos físicos fundamentales detrás de la realización del trabajo para su correcta comprensión, tales como la metodología para la medición de la aceleración de la gravedad, la marea terrestre y el concepto de deriva instrumental.

En el Capítulo 3 se describen las distintas redes gravimétricas que existen y existieron en la República Argentina, así como el alcance y la exactitud de cada una de ellas.

En el Capítulo 4 se explica el proceso de medición de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden, que incluye: la planificación de las mediciones, los métodos de medición involucrados, el instrumental utilizado y la validación de las observaciones realizadas.

En el Capítulo 5 se describe todo lo relacionado al procesamiento, análisis y ajuste de las observaciones, haciendo énfasis en los programas utilizados y en el método de ajuste de las observaciones. Por otra parte, se presentarán los resultados finales del trabajo y un análisis de los mismos.

Por último, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del presente Trabajo de Tesis de grado.

## Capítulo 2

# Fundamentos teóricos

En el presente capítulo se abordan conceptos teóricos de Gravimetría en los cuales se basa este trabajo y se mencionan los métodos de medición de la gravedad. Por otro lado, se introducen los conceptos de marea terrestre y deriva instrumental.

### 2.1. La Gravimetría

La Gravimetría es una disciplina que consiste en la medición de la aceleración de la gravedad sobre la superficie terrestre o muy próximo a ella como una función del tiempo y la posición.

Como disciplina, la Gravimetría tiene sus orígenes en la Ley de Gravitación Universal propuesta por Newton (1687), que propone que la fuerza de atracción entre dos masas  $M$  y  $m$  es directamente proporcional al producto de sus masas y, a su vez, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta fuerza se puede expresar de la siguiente manera:

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (2.1)$$

donde  $G$  es la Constante de Gravitación Universal y  $r$  es la distancia entre las masas.

A partir de la Ley de Gravitación Universal, se puede definir la aceleración gravitacional  $b$  que sufre una masa cualquiera a una distancia  $r$  de una Tierra esférica, homogénea, no rotante y de masa  $M$ :

$$b = \frac{GM}{r^2} \quad (2.2)$$

Como el campo gravitacional es un campo conservativo, se lo puede derivar de un potencial escalar, denominado potencial gravitacional  $V$  (Torge y Müller, 2012):

$$V = \frac{GM}{r} \quad (2.3)$$

Este potencial gravitacional cumple que:

$$b = -\nabla V = \frac{GM}{r^2} \quad (2.4)$$

Por otra parte, si se considera una Tierra rotante con una velocidad angular  $\omega$ , y considerando un sistema inercial fijo a la Tierra, como en la Figura 2.1, ésta producirá una aceleración

centrífuga  $z$  y en consecuencia, un potencial centrífugo asociado que resulta (Torge y Müller, 2012):

$$\phi = \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2) \quad (2.5)$$

donde:

- $\phi$  es el potencial centrífugo;
- $\omega$  es la velocidad de rotación de la Tierra;
- $x$  e  $y$  son las coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas del punto de observación. El eje  $z$  coincide con el eje de rotación.

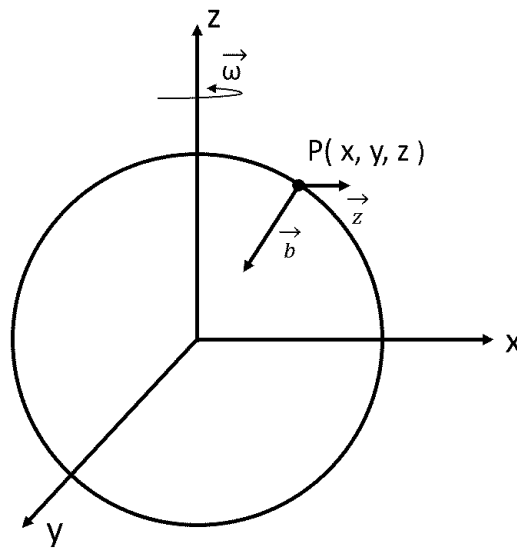


Figura 2.1: Aceleración gravitacional y aceleración centrífuga

El potencial de gravedad terrestre real ( $W$ ) resulta la suma del potencial centrífugo ( $\phi$ ) y el potencial gravitacional ( $V$ ):

$$W = \phi + V \quad (2.6)$$

y la gravedad real está dada por

$$g = -\nabla W \quad (2.7)$$

Si ahora se considera la Tierra real que aproxima a un elipsoide de revolución cuya superficie es irregular, que rota, y que cuenta con variaciones en la distribución de densidad, la gravedad en un punto  $P$  depende de:

$$g(P) = g(G, \omega^2, r, \rho(r'), t) \quad (2.8)$$

donde:

- $G$  es la constante de Gravitación Universal;
- $\omega$  es la velocidad de rotación de la Tierra;
- $r$  es la distancia al Centro de Masas de la Tierra;
- $\rho(r')$  es la función que describe la distribución de densidades del interior terrestre;
- $t$  es el tiempo.

Así, la Gravimetría consiste en la medición y estudio del campo de gravedad terrestre teniendo en cuenta las distintas variables que involucra. La medición de dicho campo se realiza mediante diversas técnicas e instrumentos (terrestres, marinos y satelitales).

Como disciplina, la Gravimetría tiene aplicaciones dentro de la Geodesia y la Geofísica. Dentro de las principales aplicaciones se destacan las siguientes:

- Determinar redes gravimétricas;
- Definir modelos de geoide gravimétricos;
- Determinar distintos tipos de alturas físicas, tales como ortométricas, dinámicas y normales;
- 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.

## 2.2. Métodos de Medición de la Gravedad

La medición de la gravedad puede llevarse a cabo de dos formas, de forma absoluta o de forma relativa. En el primer caso, la observación consiste en medir las cantidades fundamentales de la aceleración: distancia y tiempo. Conociendo estas dos cantidades es posible calcular la gravedad en un punto. En el segundo caso, el sensor se restringe a detectar directa o indirectamente alguna de las dos cantidades fundamentales mencionadas: distancia (o longitud) o tiempo.

En cuanto a las determinaciones relativas, el hecho de medir alguna de las dos magnitudes antes mencionadas establece un problema indeterminado. El mismo puede ser resuelto observando una de las dos cantidades fundamentales en una estación respecto de otra, donde la cantidad no observada se toma como fija. La diferencia de gravedad entre las dos estaciones de observación  $\Delta g$  se calcula a partir de la diferencia observada en tiempo o longitud. El resultado de la medición relativa será la diferencia de gravedad referida a una estación base con gravedad conocida.

Las mediciones relativas de la gravedad se efectúan con instrumentos mucho más económicos y fácilmente transportables que los empleados en las determinaciones absolutas. Ambos métodos de medición fueron mejorando sus precisiones a lo largo del tiempo gracias al avance tecnológico y científico. Sin embargo, los principios básicos de funcionamiento de ambos métodos no han variado en forma significativa.

Los primeros instrumentos para medir la gravedad utilizaban el método del péndulo. Éste consistía en medir el período de un péndulo y existían instrumentos tanto relativos como absolutos. Si bien el método del péndulo no se describe en este trabajo, es importante mencionarlo debido a su importancia histórica. Los principios de medición que se describen a continuación son aquellos utilizados para realizar las mediciones para este trabajo. Si bien no se explican todos los métodos existentes, los que se describen son los más utilizados en los gravímetros modernos.

### 2.2.1. Medición Absoluta de la Gravedad

Como se menciona anteriormente, una medición absoluta de la gravedad implica la medición directa de las cantidades fundamentales de la aceleración: distancia y tiempo. Entonces, el resultado que arroja esta experiencia es el valor de la magnitud del vector de gravedad. Si bien existen distintos métodos para medir la gravedad absoluta, se describe el principio actualmente más utilizado: “caída libre”. El mismo se basa en fórmulas simples del movimiento rectilíneo uniformemente variado:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (2.9)$$

donde  $x$  es la posición calculada,  $x_0$  es la posición inicial,  $v_0$  es la velocidad inicial,  $t$  es el tiempo y  $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad.

Si el cuerpo cae en un mínimo de tres planos (Figura 2.2),  $x_0$  y  $v_0$  pueden eliminarse, dado que:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \\ x_2 = x_0 + v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2 \\ x_3 = x_0 + v_0 t_3 + \frac{1}{2} g t_3^2 \end{cases} \Rightarrow g = 2 \frac{(x_3 - x_1)(t_2 - t_1) - (x_2 - x_1)(t_3 - t_1)}{(t_3 - t_1)(t_2 - t_1)(t_3 - t_1)} \quad (2.10)$$

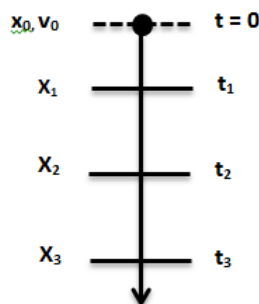


Figura 2.2: Método caída libre

Este método es el más utilizado en la actualidad para determinaciones absolutas (gravímetros absolutos). Dentro de los gravímetros absolutos transportables, ejemplos de estos equipos son: el gravímetro interferométrico creado por el Joint Institute for Laboratory Astrophysics de la Universidad de Colorado (JILAG-3); el Micro-g LaCoste™ A-10. Otro gravímetro absoluto conocido actualmente es el Micro-g LaCoste™ FG-5, siendo este no transportable y de mayor precisión que los antes mencionados. Cabe destacar que, debido a su sensibilidad, realizar mediciones con este tipo de equipos tiene un costo económico mucho mayor que en el caso de mediciones relativas y deben tenerse en cuenta diferentes aspectos para poder transportarlo.

### 2.2.2. Medición Relativa de la Gravedad

Con respecto a las determinaciones relativas de la gravedad, hoy en día uno de los principios más utilizados es el sistema “masa-resorte”. Este sistema está basado en la observación de la

posición de equilibrio de una masa suspendida por un resorte, que varía de acuerdo a la fuerza gravitatoria.

El instrumental (gravímetros relativos) involucrado en este tipo de medición es considerablemente más económico que el de las mediciones absolutas y son más versátiles y transportables que los gravímetros absolutos.

Actualmente, existen dos tipos de gravímetros relativos que, si bien parten del principio “masa-resorte”, cada uno tiene un sistema de medición diferente. A continuación se describen los dos sistemas involucrados en cada equipo:

#### I Resorte Estático

Se trata de una masa  $m$  sujeta por un resorte, el cual varía conforme lo hace la gravedad. El sistema se muestra esquemáticamente en la Figura 2.3.

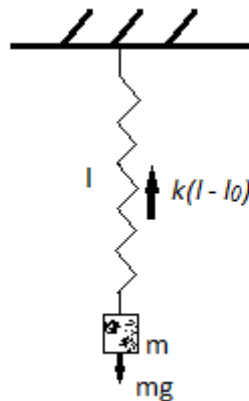


Figura 2.3: Resorte Estático

La condición de equilibrio está dada por:

$$mg - k(l - l_0) = 0 \quad (2.11)$$

donde

- $k$  la constante del resorte;
- $l$  es la longitud con una carga;
- $l_0$  la longitud del resorte sin la carga;
- $g$  la gravedad.

Diferenciando se obtiene una relación entre el cambio de gravedad  $\Delta g$  y la diferencia en longitud  $\Delta l$  observada entre dos estaciones de medición:

$$\Delta g = \frac{g}{l - l_0} = \frac{m}{k} \Delta l \quad (2.12)$$

En la diferencia de gravedad  $\Delta g$  se puede observar un comportamiento lineal, que está gobernado por la constante del resorte. Se define la sensibilidad como:



$$S = \frac{\Delta g}{\Delta l} = \frac{m}{k} \quad (2.13)$$

En la Figura 2.4 se puede observar dicho comportamiento. Es posible inferir que a mayor longitud del resorte, mayor será la sensibilidad del mismo.

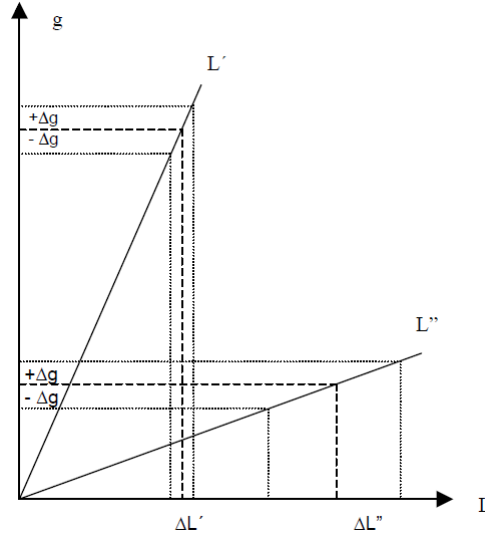


Figura 2.4: Sensibilidad resorte estático

Este sistema es el aplicado en los gravímetros Scintrex<sup>TM</sup> AUTOGRAV CG-5. Éste es uno de los gravímetros relativos más modernos.

## II Resorte Astático

Los gravímetros cuyo resorte es astático están basados en el concepto de un resorte de longitud cero, desarrollado por LaCoste (1934). El mismo cuenta con una palanca que sostiene una masa  $m$  y gira alrededor de un eje. El equilibrio se logra a través de la suma de torques en dirección vertical.

A partir de la Figura 2.5 se puede ver que el equilibrio es regido por:

$$mga \cos(\beta) = k(l - l_0)b \sin(\alpha) = k(l - l_0)b \frac{y}{l} \cos(\beta) \quad (2.14)$$

Por lo que es posible llegar a la expresión:

$$g = \frac{kb}{ma} \left(1 - \frac{l_0}{l}\right) y \quad (2.15)$$

Los resortes pueden ser de dos materiales: cuarzo o metal. El primero presenta un envejecimiento del resorte mayor en el tiempo que el segundo por lo que ya no se utilizan demasiado actualmente. Los gravímetros Lacoste & Romberg<sup>TM</sup> cuentan con el sistema de resortes metálicos astáticos y, por su portabilidad, es uno de los equipos más utilizados en campo.

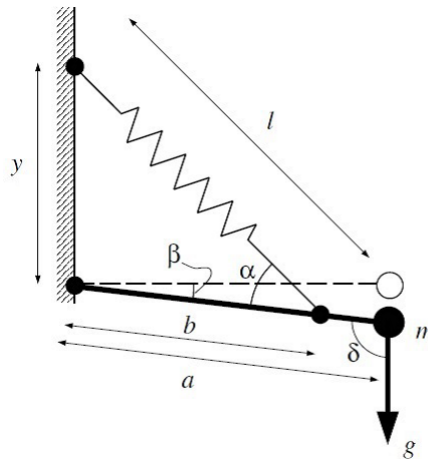


Figura 2.5: Resorte Astático

### 2.3. Marea Terrestre y Deriva Instrumental

Existen ciertas consideraciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora del procesamiento de mediciones gravimétricas, ya sean de carácter relativo o absoluto. Una vez realizada la medición, se debe tener en cuenta que el valor obtenido está alterado por una serie de efectos asociados a, por ejemplo:

- Marea terrestre: es una señal derivada de la atracción gravitatoria que generan la Luna, el Sol y otros planetas sobre la Tierra. Ésta es una señal periódica en el tiempo y puede ser modelada bajo ciertas consideraciones;
- Drift o deriva del instrumental: es el efecto producto del desgaste propio de los resortes internos de los equipos;
- 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 fenómenos de carácter natural que también afectan la medición. Éstos tienen que ver con:

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

Estos efectos que distorsionan la señal de interés deben ser correctamente modelados y eliminados antes de obtener valores de gravedad para cada estación medida. A continuación se describen dos de los efectos de mayor magnitud que afectan la medición y que fueron eliminados durante el procesamiento de los datos para este trabajo: Marea Terrestre y Deriva Instrumental.

### 2.3.1. Marea Terrestre

En la Introducción de este trabajo, se definió la Ley de Gravitación Universal, propuesta por Newton (1687), la cual describe la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos (ecuación 2.1). Así, como la Tierra genera una fuerza de carácter atractiva sobre todos los cuerpos cercanos a ella, estos cuerpos generan el mismo efecto sobre la Tierra. Este efecto produce deformaciones e importantes alteraciones en la distribución de masas de la Tierra, además de afectar la rotación y la traslación de la misma. Este fenómeno es denominado marea terrestre.

Los efectos más importantes de marea terrestre se deben a la atracción que generan el Sol y la Luna sobre la Tierra. Al girar la Tierra alrededor del Sol y la Luna al girar alrededor de la Tierra, generan un efecto periódico a lo largo del tiempo similar al de la Figura 2.6. Además, el resto de los cuerpos celestes (como los planetas) generan un efecto similar sobre la Tierra, aunque considerablemente menor frente al generado por el Sol y la Luna.

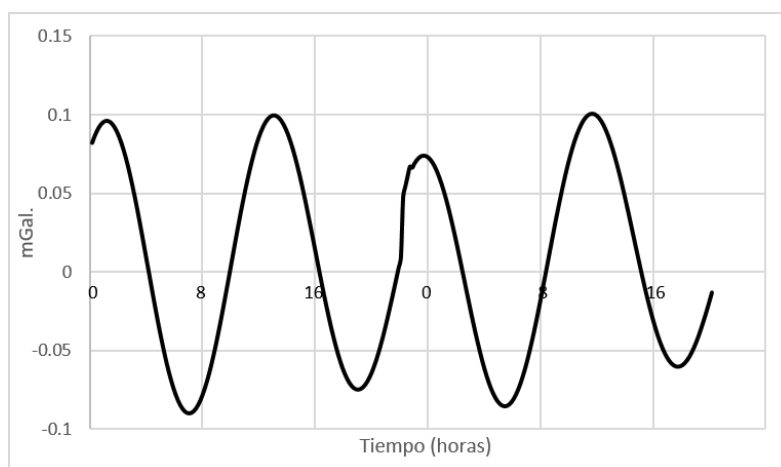


Figura 2.6: Marea terrestre

Para analizar la fuerza que genera cada cuerpo, es posible estudiarla mediante dos métodos (Wenzel, 1997):

- Usando las efemérides de los cuerpos celestes que rodean a la Tierra. Éstas permiten calcular el potencial de marea para una Tierra sólida, rígida y sin océanos. Cabe destacar que la exactitud de este método es pobre dadas las hipótesis del mismo. Este método es el utilizado por Longman (1959) para calcular las correcciones de marea;
- Desarrollando el potencial de marea en función de armónicos esféricos. Éstos permiten definir distintos catálogos para el potencial de marea dependiendo del grado de aproximación del mismo. Haciendo uso de estos catálogos e introduciendo parámetros elásticos de la Tierra y modelos de carga oceánica es posible obtener mejores aproximaciones para las correcciones de marea. Éste método es el más utilizado actualmente.

Para definir la fuerza de marea, se analiza primeramente las fuerzas que tienen lugar dentro de un sistema que contiene a la Tierra y un determinado cuerpo celeste (Figura 2.7).

Entonces, para un cuerpo celeste cercano a la Tierra, la fuerza de marea se definirá de la siguiente manera (Furones et al., 2003):

$$\Delta F = F_{pm} - F_{em} \quad (2.16)$$

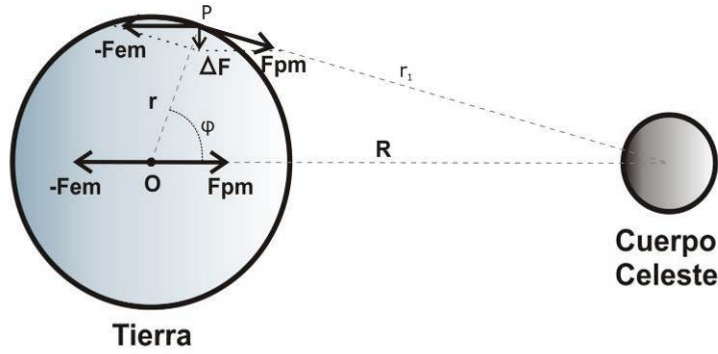


Figura 2.7: Análisis de la fuerza de marea

donde:

- $F_{pm}$  es la fuerza de atracción que genera el cuerpo hacia su centro de masa;
- $-F_{em}$  es la fuerza centrífuga que mantiene al cuerpo en órbita. Ésta afecta de igual manera en todos los puntos de la Tierra. En el centro de la Tierra, ésta fuerza se ve compensada totalmente por la fuerza de atracción gravitatoria  $F_{pm}$  por lo que  $\Delta F = 0$ .

Al igual que la fuerza de gravedad de la Tierra, es posible obtener la fuerza de marea a partir de un potencial armónico (cumple la ecuación de Laplace). Siguiendo el desarrollo de Munk y Cartwright (1966), el potencial asociado a la fuerza de marea  $V_t$  en el punto  $P$  será:

$$V_t = \frac{GM_{cc}}{r_1} = \frac{GM_{cc}}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2 - 2\left(\frac{r}{R}\right) \cos(\varphi)}} \quad (2.17)$$

donde:

- $G$  es la constante de gravitación universal;
- $M_{cc}$  es la masa del cuerpo celeste en cuestión;
- $r$  el radio de la Tierra;
- $r_1$  la distancia entre un punto  $P$  y el centro del Cuerpo Celeste;
- $R$  la distancia entre el centro de la Tierra y el centro del Cuerpo Celeste;
- $\varphi$  el ángulo entre los radiovectores  $r$  y  $R$  llamado ángulo cenital.

Éste potencial armónico es posible expresarlo como un desarrollo en serie de la siguiente forma:

$$V_t = \frac{GM_{cc}}{R} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{R}\right)^n P_n(\cos(\varphi)) \quad (2.18)$$

donde  $P_n(\cos(\varphi))$  son los Polinomios de Legendre evaluados en  $\cos(\varphi)$ .

Los Polinomios de Legendre se expresan de la siguiente manera:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n] \quad (2.19)$$

Por otra parte, el ángulo cenital  $\varphi$  es posible expresarlo en función de las coordenadas geográficas del punto  $P$  y las coordenadas astronómicas del cuerpo celeste, como se puede ver en la Figura 2.8. Cabe mencionar que estas últimas dependerán del tiempo (momento de observación).

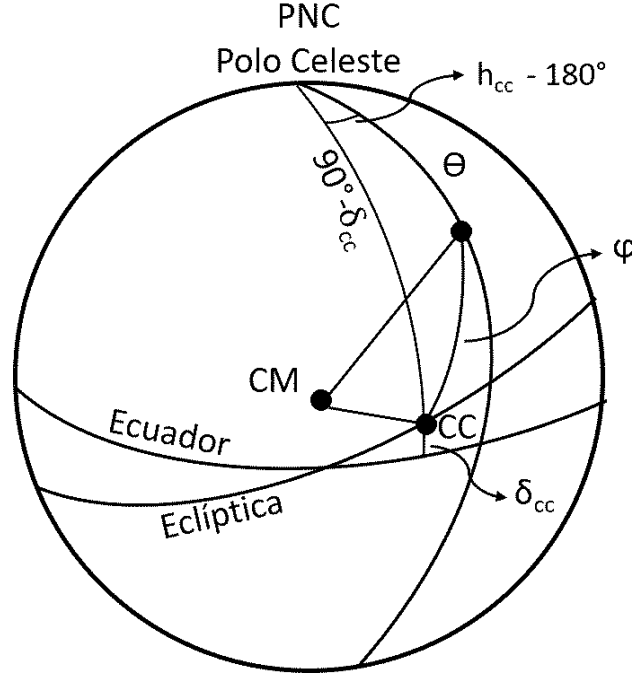


Figura 2.8: Relación de  $\varphi$  con las coordenadas geográficas del punto  $P$  y la posición de la Luna

$$\cos(\varphi) = \cos(\theta) \cos(\delta_{cc}) + \sin(\theta) \sin(\delta_{cc}) \cos(h_{cc}) \quad (2.20)$$

donde:

- $\varphi$  es el ángulo cenital;
- $\theta$  es la colatitud geográfica del punto  $P$ ;
- $\delta_{cc}$  es la declinación del cuerpo celeste;
- $h_{cc}$  es ángulo horario del cuerpo celeste.

La ecuación 2.20 permite escribir los Polinomios de Legendre en función de las Funciones Asociadas de Legendre y expresarlos como un desarrollo en armónicos esféricos normalizados (Heiskanen y Moritz, 1967):

$$P_n(\cos(\varphi)) = \frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos(\theta)) \bar{P}_{nm}(\cos(\delta_{cc})) \cos(mh_{cc}) \quad (2.21)$$

Los Polinomios Asociados de Legendre de Primer Orden normalizados se escribirán:

$$\bar{P}_{nm}(x) = (-1)^m (1-x^2)^{m/2} \frac{d^m}{dx^m} \left[ \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2-1)^n \right] \sqrt{(2n+1) \frac{(n-m)!}{(n+m)!} (2-\delta_{m,0})} \quad (2.22)$$

donde ahora  $\delta_{m,0}$  es la delta de Kronecker.

Introduciendo la ecuación 2.21 en la expresión del potencial  $V_t$  de la ecuación 2.18, se obtiene el desarrollo en armónicos esféricos del potencial de marea sobre un punto de la Tierra debido a un determinado cuerpo celeste:

$$V_t = \frac{GM_{cc}}{R} \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{r}{R} \right)^n \frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos(\theta)) \bar{P}_{nm}(\cos(\delta_{cc})) \cos(mh_{cc}) \quad (2.23)$$

donde  $n$  y  $m$  serán el grado y orden del desarrollo en armónicos esféricos.

A partir del grado de aproximación del desarrollo es posible obtener distintas componentes espectrales que se clasifican según su período, amplitud y fase. Los catálogos de marea consisten en tablas de amplitudes, fases y frecuencias para cada armónico del mismo. La resolución y precisión de los catálogos aumentará a medida que se extiende el desarrollo. Los primeros coeficientes están principalmente asociados a la atracción generada por la Luna y el Sol, cuya magnitud es la más importante. A medida que aumenta el orden del desarrollo, se tendrá en cuenta la atracción que generan otros astros (por ejemplo, Venus, Júpiter, Saturno, etc.). Entre los catálogos más importantes cabe mencionar a los siguientes:

- Catálogo de Doodson (1921): utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 378;
- Catálogo de Cartwright-Edden (1973): utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 505;
- Catálogo de Büellesfeld (1985): utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 665; y
- Catálogo de Tamura (1987): utiliza un desarrollo en armónicos esféricos de grado 1200, éste uno de los más precisos.

A partir de estos modelos es posible calcular cada una de las componentes la aceleración de marea ( $\vec{b} = (b_r, b_\theta, b_\lambda)$ ) y, en consecuencia, las correcciones de marea. Éstas surgen de diferenciar el potencial de marea (ecuación 2.23) en función de cada variable:

$$b_r = \frac{\partial V_t}{\partial r} \quad b_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial V_t}{\partial \theta} \quad b_\lambda = \frac{1}{r \sin(\theta)} \frac{\partial V_t}{\partial \lambda} \quad (2.24)$$

Formalmente, para poder aplicar la corrección de marea a una determinada observación gravimétrica, el sistema de coordenadas utilizado debe coincidir con la línea de la plomada local por lo que a las ecuaciones 2.24 debe aplicarse una transformación de coordenadas. Para poder efectuar la transformación de coordenadas se necesita conocer la diferencia entre la línea de la plomada y la dirección normal a la superficie de referencia (deflexión de la vertical), lo que demanda métodos astronómicos para su determinación. En la práctica ésta transformación no se realiza.

Actualmente, existen programas que computan la corrección de marea a partir de distintas aproximaciones del potencial. Para dicho cálculo será indispensable contar con ciertos datos acerca de la medición: coordenadas geográficas del punto (latitud, longitud y altura), fecha y hora de la medición.

### 2.3.2. Deriva Instrumental

La Deriva Instrumental o *drift* es un efecto temporal que se observa en las mediciones a lo largo del tiempo en un gravímetro. El mismo está asociado al desgaste propio de cada instrumento y otros factores, tales como el desgaste del sistema de resortes y palancas y pequeñas variaciones en la temperatura de operación del equipo. El paso del tiempo produce un desgaste en el instrumento, principalmente en su sistema de resortes y en 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 en las lecturas realizadas con el instrumental. Generalmente, suele ser un efecto lineal con el tiempo pero puede cambiar a lo largo del tiempo. Así mismo, en cada gravímetro se observará un comportamiento distinto de la deriva debido al material con el que esté fabricado el sistema de resortes (por ejemplo, en el caso de los gravímetros Scintrex<sup>TM</sup>, la deriva será más alta que para los gravímetros Lacoste & Romberg<sup>TM</sup>).

Dado que este efecto no se puede evitar, una forma de corregirlo es realizar sucesivas mediciones sobre una misma estación (usualmente denominada “estación base”) en intervalos de tiempo cortos (menores a 10 o 12 horas). En ese sentido, las distintas mediciones llevadas a cabo en la estación base se pueden graficar en un diagrama con ejes cartesianos, cuyas abscisas corresponderán al tiempo transcurrido para cada observación y cuyas ordenadas corresponderán al valor de gravedad obtenido. A partir del gráfico, es posible determinar la pendiente de la recta (si se asume lineal) que une los puntos, resultando éste valor la deriva del gravímetro. Si se quisiera aproximar una deriva no lineal, se necesitarán más observaciones sobre la estación base. 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).

## Capítulo 3

# Sistemas de referencia gravimétricos

Un sistema de referencia gravimétrico se establece a partir de un conjunto de definiciones, estándares y recomendaciones para realizar mediciones de Gravedad. La materialización de dicho sistema da origen al marco de referencia gravimétrico y consiste en puntos con coordenadas y gravedades conocidas, medidas sobre la superficie terrestre. Las redes gravimétricas globales, continentales y/o nacionales forman parte de las densificaciones del marco de referencia gravimétrico.

En la República Argentina existen diversas redes gravimétricas que cubren la totalidad del territorio nacional. A continuación se enumeran dichas redes gravimétricas y sus principales características:

### 3.1. 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 reemplaza hasta el 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 exactitud del Sistema Potsdam fue estimada en  $\pm 3$  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 cuadripéndular Von Sterneck.

En el año 1928, el Ing. Félix Aguilar realiza una segunda vinculación con Potsdam mediante un nuevo equipo cuadripéndular 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 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 equipo cuadripéndular Askania, y se determina el valor del nuevo datum gravimétrico nacional:



979705.0 mGal.

### 3.2. Red de Estandarización Gravimétrica Internacional (IGSN71)

En el año 1971, durante la XV Asamblea General de la Unión Internacional de Geodestas y Geofísicos (IUGG) celebrada en la ciudad de Moscú, se adopta la red gravimétrica IGSN71 (International Gravity Standardization Net 1971) como el nuevo sistema gravimétrico internacional, reemplazando, el hasta entonces vigente, Sistema Potsdam. La red se materializó con mil ochocientos cincuenta y cuatro 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 son inferiores a  $\pm 0.1$  mGal (Morelli et al., 1972).

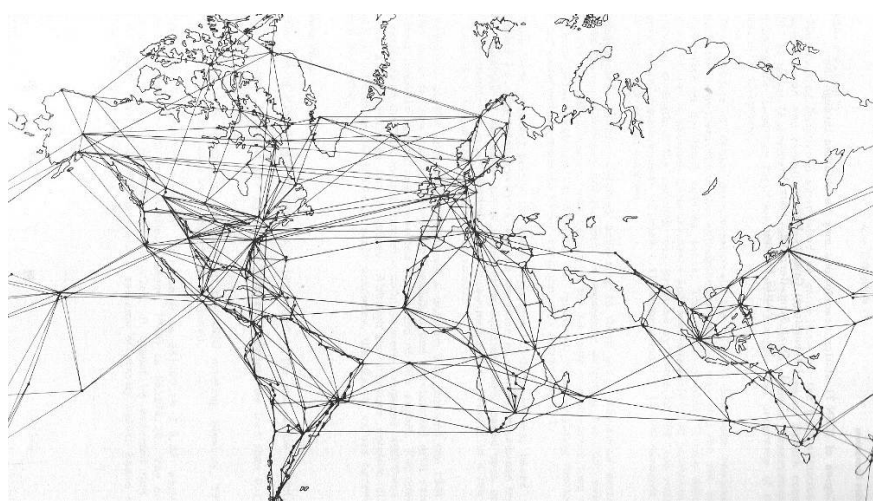


Figura 3.1: Red IGSN71

### 3.3. Base de Calibración de la República Argentina (BACARA)

La Base de Calibración de la República Argentina (BACARA) constituye 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 Petrolíferos 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 ochenta y seis valores de gravedad en la Argentina (Figura 3.2), veintiún en Bolivia, tres en Uruguay y dos en Paraguay. La medición se llevó a cabo con cuatro gravímetros LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> facilitados por el IAGS (G-056, G-057, G-145 y G-146) y un gravímetro Worden<sup>TM</sup> provisto por el IG. Los traslados se realizaron mediante aviones Beechcraft C45 pertenecientes a la Aviación Naval. Se volaron un total de

35.000 km en ciento cuarenta 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 trece 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  $\pm 0.085$  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 Internacional de Geodestas y Geofísicos (IUGG) celebrada en la ciudad de Moscú en el año 1971 (Instituto Geográfico Militar, 1971).

La red IGSN71 contaba con once puntos coincidentes con puntos de la red BACARA. De este modo, 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 IGNS71.

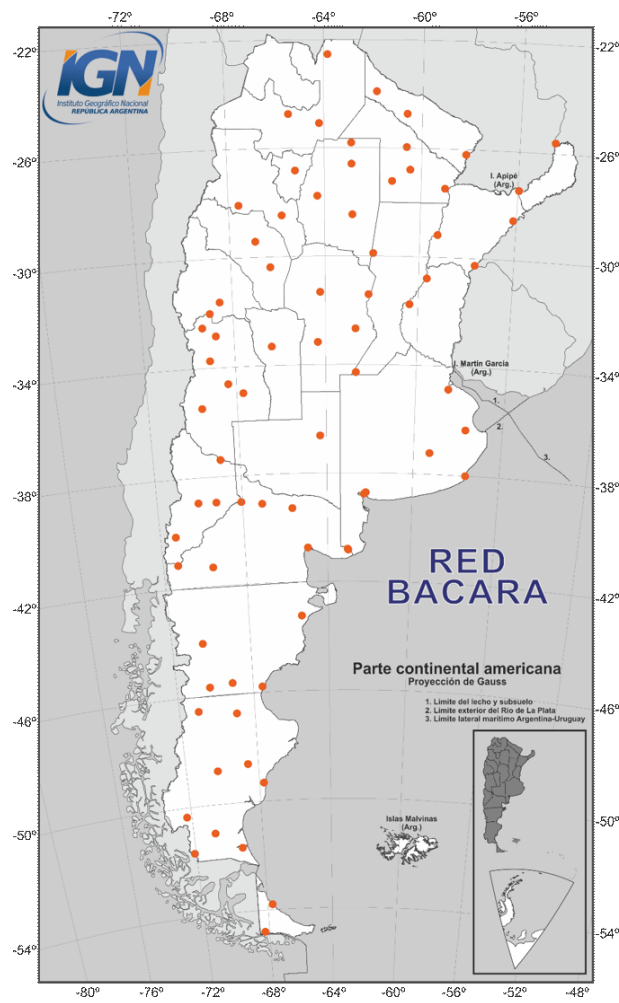


Figura 3.2: Red BACARA

### 3.4. 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 3.3) (Torge et al., 1995).

En la Tabla 3.1 se pueden observar las coordenadas y los valores de gravedad que fueron determinados en los años 1988 y 1991. La exactitud estimada de los valores de gravedad es de  $\pm 0.007$  mGal

Tabla 3.1: Coordenadas y gravedades de la Primer Red Gravimétrica Absoluta

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Gravedad [mGal]</b>
CORI	-45.8246389	-67.4635000	980663.759
IGN2	-34.5736111	-58.5194444	979690.069
IGN3	-34.5736111	-58.5194444	979689.141
PAYS	-32.3782778	-58.0299444	979523.526
SLOR	-24.7212778	-65.5046389	978409.410
TAN1	-37.3216667	-59.0825000	979904.352
ZON1	-31.5213889	-68.6823056	979141.649

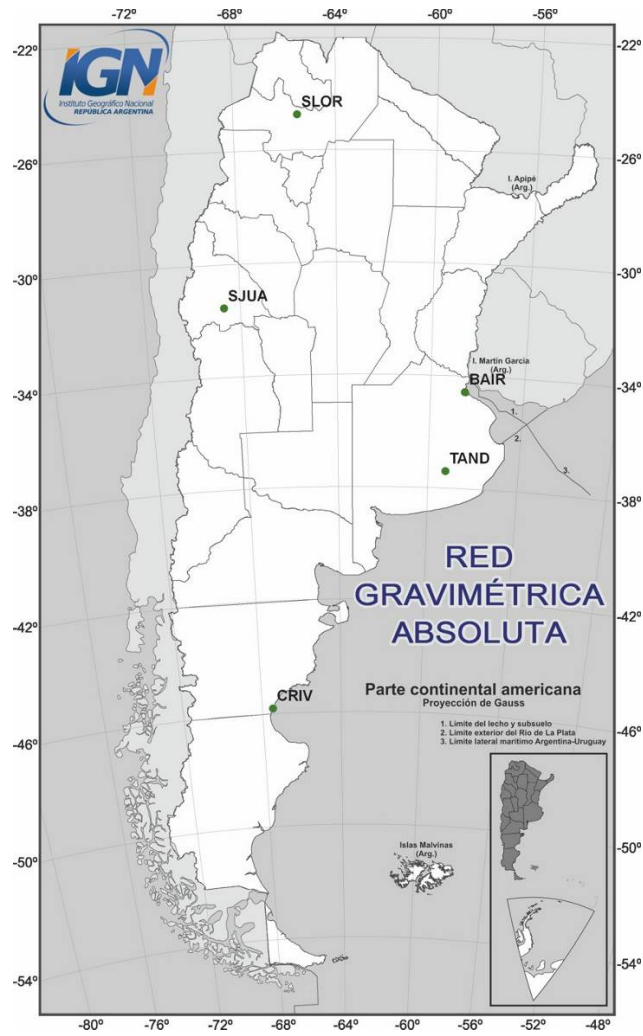


Figura 3.3: Primera Red Gravimétrica Absoluta

### 3.5. 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 treinta y seis puntos de gravedad absoluta uniformemente distribuidos a lo largo del territorio Nacional y uno en la República Oriental del Uruguay (Figura 3.4).

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 treinta y cinco estaciones gravimétricas con un desvío estándar de  $\pm 0.020$  mGal (Lauría et al., 2015).

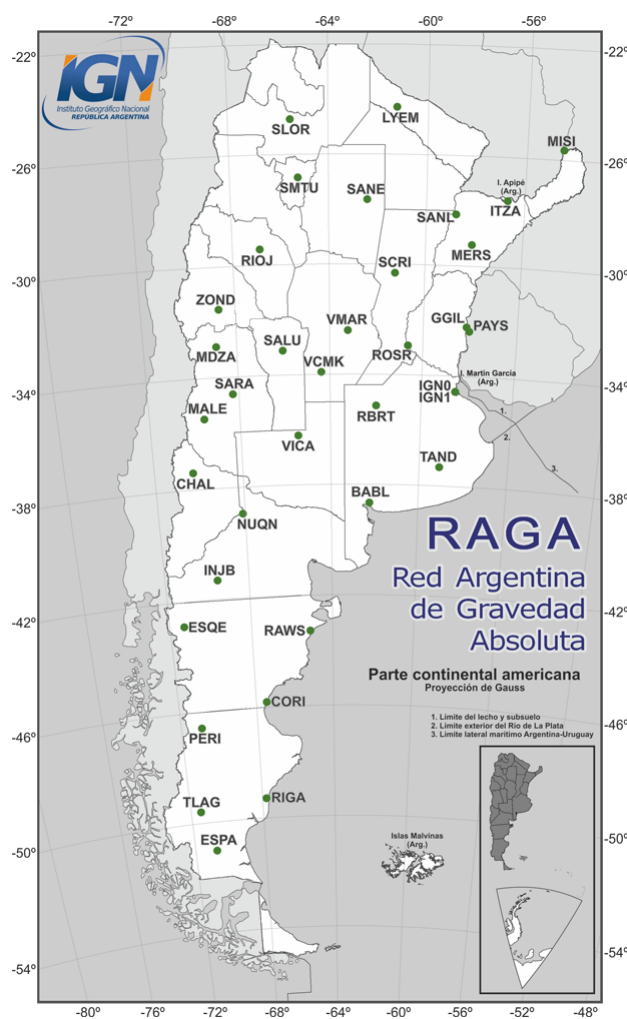


Figura 3.4: Red RAGA

En la Tabla 3.2 se pueden observar las coordenadas y los valores de gravedad que fueron determinados para los treinta y seis sitios que componen la red RAGA.

Tabla 3.2: Coordenadas y gravedades de la red RAGA

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Gravedad [mGal]</b>
BABL	-38.667417	-62.232333	980046.225
CHAL	-37.388972	-70.256472	979653.626
CORI	-45.824639	-67.463500	980663.760
ESPA	-51.029639	-70.777167	981084.686
ESQE	-42.898333	-71.296889	980231.722
GGIL	-32.216556	-58.147028	979517.779
IGN1	-34.572667	-58.516333	979688.229
INJB	-41.321167	-69.503444	980021.640
ITZA	-27.584250	-56.688194	979122.745
LYEM	-24.280806	-61.236333	978882.640
MALE	-35.482861	-69.585694	979325.663
MDZA	-32.893639	-68.876306	979199.554
MERS	-29.227111	-58.072556	979239.943
MISI	-25.638222	-54.538972	978905.491
NUQN	-38.962944	-68.098111	979965.718
PAYS	-32.378278	-58.029944	979523.523
PERI	-46.589694	-70.926361	980624.557
RAWS	-43.299417	-65.107194	980458.033
RBRT	-35.140917	-61.972722	979723.693
RIGA	-49.299611	-67.771694	980993.919
RIOJ	-29.425333	-66.862250	979042.376
ROSR	-32.947833	-60.630583	979548.444
SALU	-33.120833	-66.025278	979316.985
SANE	-27.644861	-62.413833	979123.329
SANL	-28.137583	-58.768833	979165.409
SARA	-34.632083	-68.259694	979495.707
SCRI	-30.310000	-61.242278	979327.540
SLOR	-24.721278	-65.504639	978409.389
SMTU	-26.843417	-65.230167	978886.042
TAND	-37.323528	-59.082000	979903.712
TLAG	-49.598639	-71.444889	980959.907
VCMK	-33.916500	-64.368111	979580.009
VICA	-36.216972	-65.436667	979752.736
VMAR	-32.409389	-63.216667	979473.584
ZON2	-31.545278	-68.684361	979141.662
ZOND	-31.545278	-68.684361	979141.679

Estos valores fueron publicados y oficializados el 2 de diciembre del año 2016 por el Instituto Geográfico Nacional y fueron los utilizados como puntos de referencia para el desarrollo de este trabajo. Por otra parte, existen cuatro puntos de la red RAGA que coinciden con la Primera Red Absoluta. En la Tabla 3.3 pueden observarse las diferencias de dichos puntos.

Tabla 3.3: Diferencias de la red RAGA con la antigua Red Absoluta

Nombre	Diferencias [mGal]
CORI	-0.001
PAYS	0.003
SLOR	0.021
ZON1	-0.013

### 3.6. Red Gravimétrica de Segundo Orden (RSO-Ar)

La RSO-Ar es coincidente con los puntos que componen la Red de Nivelación de Alta Precisión de la República Argentina. 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).

En la actualidad, la red está compuesta por aproximadamente catorce mil pilares (Figura 3.5) que coinciden, en su mayoría, con puntos altimétricos de la red de nivelación de alta precisión (Piñón et al., 2014).



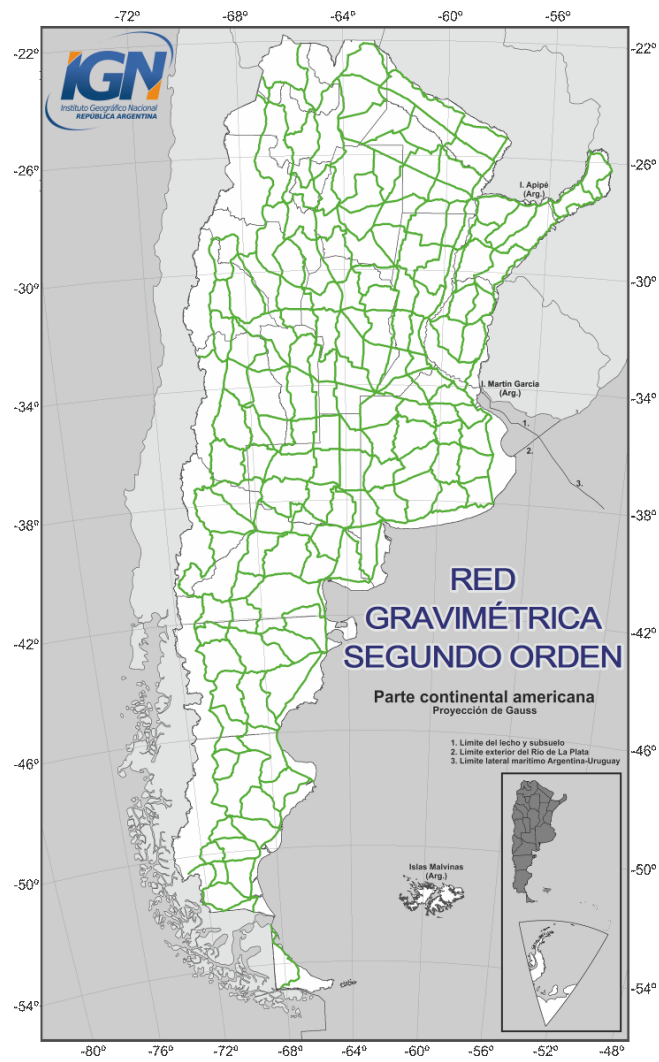


Figura 3.5: Distribución de los puntos de la RSO-Ar

## Capítulo 4

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

Durante este capítulo se describen aspectos técnicos del proceso de medición. Entre estos, se comenta acerca de la planificación de las campañas gravimétricas, los métodos de medición utilizados, el instrumental utilizado y el control de las observaciones.

### 4.1. Planificación de campañas gravimétricas

La medición de la red fue dividida en cinco etapas o campañas (norte, central, litoral, cuyo y sur) más una campaña de remediciones. Las mediciones fueron llevadas a cabo entre los años 2012 y 2015 (Figura 4.1).

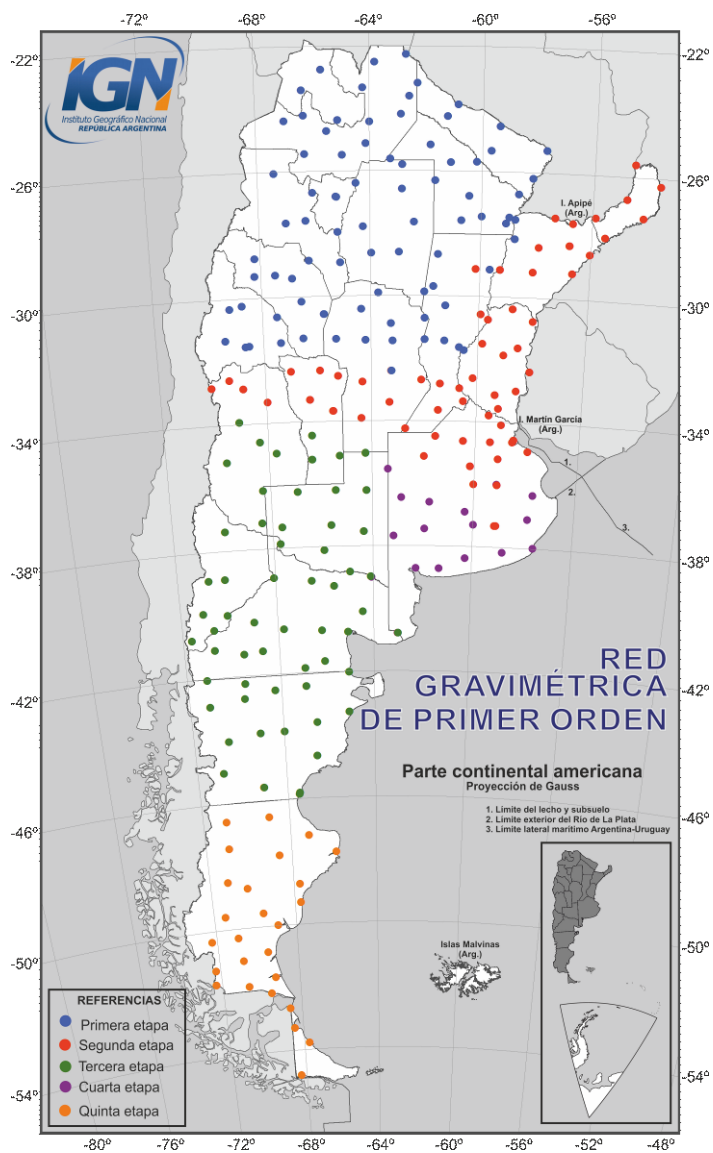


Figura 4.1: Planificación de la medición de la Red Gravimétrica de Primer Orden

## 4.2. Medición de la Red

Previo a la medición, se llevó a cabo la planificación de cada una de las campañas. Dicha planificación consistió en diagramar y determinar 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” y consiste en la observación de un número determinado de estaciones gravimétricas (PG), partiendo en un punto o base y finalizando el día de medición con una reobservación en el mismo punto base, como se muestra en la Figura 4.2.

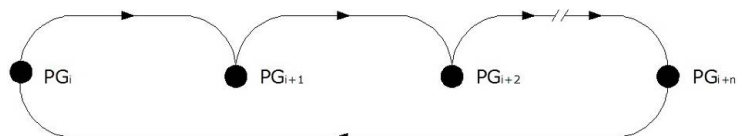


Figura 4.2: Método de medición sin reobservación

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 con el fin de considerar un comportamiento lineal de la deriva instrumental.

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 4.3).

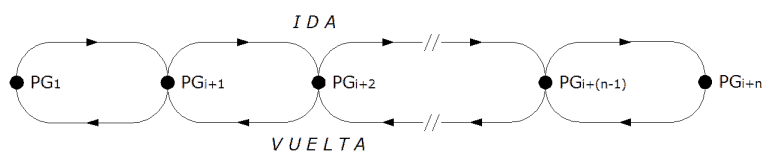


Figura 4.3: Método de ida y vuelta

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 4.4 se pueden observar las mediciones realizadas entre los puntos que componen la Red de Primer Orden y la vinculación a la red RAGA.

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.

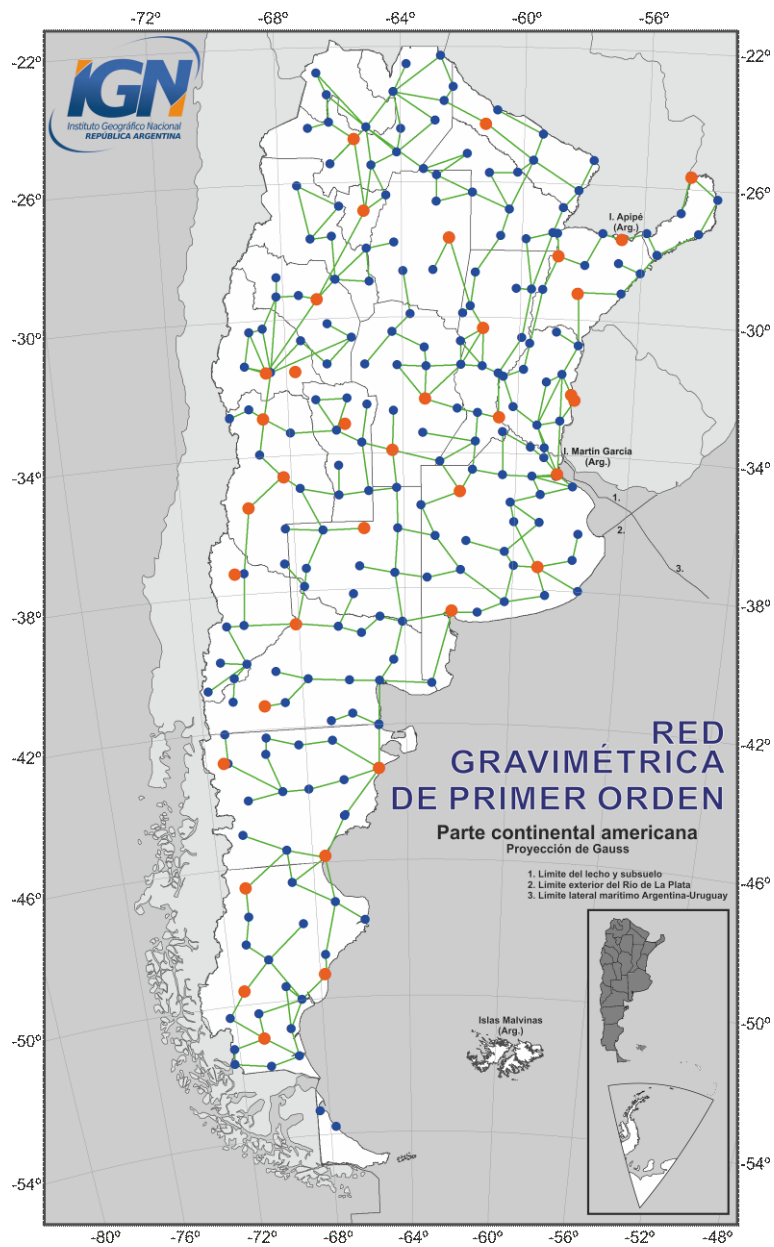


Figura 4.4: Ajuste de la RPO-Ar

### 4.3. Instrumental Utilizado

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

- LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> G-043 propiedad del IGN;
- LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> G-069 propiedad de la UNR;
- LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> G-673 propiedad del IGN;
- Scintrex<sup>TM</sup> AUTOGRAV CG-5 #40484 propiedad de la UNSJ; y
- Scintrex<sup>TM</sup> AUTOGRAV CG-5 #41218 propiedad del IGN.

En el Anexo se muestran las tablas utilizadas para la transformación de las lecturas efectuadas con gravímetros LaCoste & Romberg<sup>TM</sup>. En el caso de los gravímetros Scintrex<sup>TM</sup> CG-5, el factor de transformación de lecturas utilizado fue 1.

#### 4.3.1. Gravímetro LaCoste & Romberg<sup>TM</sup>

El gravímetro LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> (Fett, 1992) está basado en un sistema “masa-resorte”, cuyo resorte tiene una “longitud cero” y que fuera diseñado por LaCoste (1934). El gravímetro LaCoste & Romberg<sup>TM</sup> 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 rellenado 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<sup>TM</sup> es de 0.004 mGal y la precisión que se puede obtener oscila entre 0.010 y 0.050 mGal (Torge, 1989).



Figura 4.5: Gravímetro LaCoste & Romberg<sup>TM</sup>

### 4.3.2. 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 e incluso de prospección.

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 4.6: Gravímetro Scintrex™ Autograv CG-5

## 4.4. Control de Lecturas Observadas

Con el fin de 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). 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.



El programa 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.

Por otra parte, el programa realiza un control sobre las observaciones calculando la diferencia entre las mediciones (en mGal) y la diferencia horaria de cada "rulo" o circuito. Si la diferencia horaria entre apertura y cierre del circuito es mayor a 10 horas, el programa alertara al operador para remedir dichas lecturas. Además, si la diferencia en mGal entre las mediciones de un mismo punto dentro de un circuito es mayor a 0.060 mGal, el programa indica que dicho punto debe remedirse dado que, habiéndose eliminado el efecto de drift instrumental y de marea, la diferencia debiera ser considerablemente menor.

## Capítulo 5

# Procesamiento, Análisis y Ajuste de las Observaciones

El siguiente capítulo estará abocado a describir los programas estudiados para el procesamiento de las observaciones gravimétricas así como también se describirá el método utilizado para el ajuste de las lecturas. Por otro lado, se presenta el criterio utilizado para seleccionar aquellos puntos de referencia para el mismo.

### 5.1. 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 atmosférica.

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 y Tayler (1971): 505 coeficientes en armónicos esféricos;
- Cartwright y Edden (1973): 505 coeficientes en armónicos esféricos;

- Büllesfeld (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 exactas 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. No se realizaron correcciones por Carga Atmosférica o Carga Oceánica dado que la amplitud de estas correcciones están por debajo de los desvíos estándar esperados en los resultados.

## 5.2. 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 el trabajo de 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 período relativamente corto de tiempo. En ese sentido, para el desarrollo del presente trabajo los circuitos gravimétricos fueron observados en un tiempo inferior a diez o doce horas cada uno con el fin de preservar la precisión del instrumento (0.01 mGal.).

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.

## 5.3. 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 y 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

$$\begin{aligned}
M - z_1 &= v_1 \\
M - z_2 &= v_2 \\
&\vdots \\
&\vdots \\
&\vdots \\
M - z_n &= v_n
\end{aligned} \tag{5.1}$$

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

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n p_i v_i^2 = p_1 v_1^2 + p_2 v_2^2 + \dots + p_n v_n^2 \right\} \tag{5.2}$$

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). La ventaja de asumir que las lecturas no están correlacionadas radica en que se las asume independientes del resto de las observaciones y, en consecuencia, la matriz de pesos de las observaciones será una matriz diagonal. Una vez reducidas, las lecturas se ajustan como lecturas independientes asumiendo el siguiente modelo (Andersen y Forsberg, 1996):

$$y_k = \frac{1}{s}(g_k + a_k + b_m(t - t_0) + v_k) \tag{5.3}$$

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:

$$y_k = g_k + a_k + b_m(t - t_0) + v_k \tag{5.4}$$

A partir de las ecuaciones de observación se tendrá que para dos observaciones dentro de un mismo circuito

$$y_k - y_{k-1} = g_k - g_{k-1} + a_{k,k-1} + b_m(t_k - t_{k-1}) + v_{k,k-1} \tag{5.5}$$

Teniendo en cuenta la ecuación 5.5 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

$$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{k,m} - y_{k-1,m} \\ y_{k,m+1} - y_{k-1,m+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \dots 0 \ -1 \ 1 \ 0 \ \dots \ (t_{k,m} - t_{k-1,m}) & 0 & \dots \\ 0 \ \dots 0 \ -1 \ 1 \ 0 \ \dots & (t_{k,m+1} - t_{k-1,m+1}) & 0 \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ g_{k-1} \\ g_k \\ \cdot \\ \cdot \\ g_M \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{k,m} - v_{k-1,m} \\ v_{k,m+1} - v_{k-1,m+1} \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

El sistema de ecuaciones 5.6 es un sistema lineal que respeta la forma (Gemael, 1994)

$$Y = AX + v \quad (5.7)$$

donde  $Y$  es el vector que involucra las observaciones realizadas,  $A$  es la matriz de coeficientes conocidos, usualmente llamada matriz de diseño,  $X$  representa el vector de parámetros incógnita y  $v$  el vector de los residuos.

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

$$PY = PAX + Pv \quad (5.8)$$

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

El sistema propuesto en la ecuación 5.8 es posible resolverlo de varias maneras. Uno de ellos consiste construir la matriz de ecuaciones normales y resolver el sistema a partir del método de mínimos cuadrados:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P Y \quad (5.9)$$

La ventaja de utilizar las ecuaciones de observación como en la ecuación 5.4, es que se puede asumir que no existe ningún tipo de correlación entre las observaciones. Los valores de gravedad absolutos de la red RAGA también se agregan como ecuaciones independientes de la siguiente forma

$$\begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g_{RAGA} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g_M \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

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  $(A^T P A)$ . El algoritmo permite hallar la solución del sistema en forma rápida y eficaz dado que  $(A^T P A)$  resulta ser una matriz diagonal.

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 inicial resulta de normalizar el desvío estándar a priori de las observaciones, el cual se supone 0.020 mGal. El software realiza varias pruebas modificando el peso de cada observación en cada paso. Esto permite una ponderación más realista de las mediciones relativas.

Para realizar el ajuste final de la red gravimétrica, debieron eliminarse aquellas observaciones que no cumplieran con las condiciones enunciadas en la sección 4.4 (Control de las Lecturas Observadas). 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 2.358 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	0.02
2	979653.626	0.02
3	980663.760	0.02

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 como control 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).

### 5.3.1. Criterio de Selección de Puntos de Referencia

En la sección anterior se menciona que el ajuste de los puntos pertenecientes a la RPO-Ar fue realizado utilizando 33 puntos de gravedad absoluta de la red RAGA como valores de referencia.

Una vez realizado todo el procesamiento de las observaciones y teniendo todas las lecturas a considerar en el ajuste, se comenzó a agregar de a un punto de referencia en al ajuste. Así, primeramente se ajustó la red a un único punto RAGA, luego a dos, a tres, etc. De esta manera fue posible evaluar, a medida que se agregaba cada uno de los puntos de referencia, si la estadística de los resultados obtenidos mejoraba o no. En definitiva, el criterio utilizado para seleccionar aquellos puntos a utilizar en el ajuste final consistió en analizar si a medida que se iba agregando cada punto de referencia, los desvíos estándar de los valores de gravedad ajustados mejoraban. Si éstos mejoraban, el punto se agregaba. Sino, el punto no se consideraba para el ajuste.

Existen únicamente dos puntos que causaron que los desvíos estándar empeoraran y por esta razón no fueron considerados para el ajuste final. Estos puntos fueron: SALU (ubicado en la capital de la provincia de San Luis) y VCMK (ubicado en Vicuña Mackenna, provincia de Córdoba). Con el fin de evaluar cuál era el problema con dichos puntos, se realizó un ajuste de las observaciones sin utilizar VCMK y SALU como puntos de referencia. Las diferencias entre la gravedad de la red RAGA y la gravedad ajustada se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Diferencias de los puntos SALU y VCMK entre gravedades RAGA y ajustadas

Nombre	Gravedad RAGA [mGal]	Gravedad Ajustada [mGal]	Diferencia [mGal]
SALU	979316.985	979318.075	-1.090
VCMK	979580.009	979581.251	-1.242



Las diferencias mostradas en la Tabla 5.1 permitieron decidir no incluir éstos dos puntos de la red RAGA en el ajuste final de la RPO-Ar.

## Capítulo 6

# Resultados Finales y Análisis

En el siguiente capítulo se presentan los resultados finales del ajuste de la RPO-Ar así como también se expone un análisis sobre los mismos.

### 6.1. Resultados Finales

En la Tabla 6.1 se pueden observar los valores gravimétricos finales de los 227 puntos que componen la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden. Para dicho ajuste se utilizaron 33 puntos de referencia pertenecientes a la red RAGA.

Tabla 6.1: Coordenadas y gravedades de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal.]	Desv. Est. [mGal.]
NODAL 2	-51.69078	-72.29717	981163.852	0.025
NODAL 3	-51.87006	-70.59967	981185.291	0.023
NODAL 4	-51.63728	-69.23011	981192.161	0.022
NODAL 5	-51.25578	-72.23644	981107.606	0.025
NODAL 6	-51.02967	-70.77681	981084.633	0.020
NODAL 7	-50.81889	-69.51408	981086.498	0.021
NODAL 8	-50.33917	-72.25519	981016.358	0.025
NODAL 9	-50.29525	-70.92158	980988.320	0.023
NODAL 10	-49.98919	-68.91364	981044.705	0.020
NODAL 11	-49.59878	-71.44611	980960.143	0.020
NODAL 12	-49.57794	-69.58172	980982.055	0.028
NODAL 13	-49.31400	-67.71917	981003.463	0.022
NODAL 14	-48.75103	-70.24925	980857.075	0.021
NODAL 15	-48.72528	-67.70308	980926.376	0.025
NODAL 19	-47.75164	-65.90200	980859.590	0.034
NODAL 20	-47.44356	-70.92586	980653.977	0.028
NODAL 21	-47.77478	-68.58336	980763.378	0.027
NODAL 22	-47.18389	-67.14528	980772.589	0.022
NODAL 23	-46.59356	-70.93003	980625.179	0.019
NODAL 24	-46.54125	-68.93181	980662.941	0.024
NODAL 26	-45.86350	-67.47503	980670.464	0.018

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Grav. [mGal.]</b>	<b>Desv. Est. [mGal.]</b>
NODAL 27	-45.58669	-69.06825	980594.179	0.018
NODAL 29	-45.04247	-70.82408	980438.200	0.022
NODAL 32	-44.05189	-70.47056	980335.444	0.023
NODAL 33	-43.86456	-69.04675	980376.789	0.019
NODAL 35	-43.84836	-67.98536	980445.734	0.022
NODAL 36	-43.60711	-66.53111	980420.300	0.027
NODAL 37	-43.30014	-65.10539	980457.954	0.017
NODAL 40	-42.90542	-71.14558	980208.481	0.021
NODAL 41	-42.73244	-69.60936	980271.395	0.029
NODAL 42	-42.43644	-66.94150	980285.672	0.024
NODAL 43	-42.52175	-68.28497	980128.641	0.029
NODAL 44	-42.25231	-69.55231	980106.743	0.025
NODAL 46	-41.66550	-66.09439	980174.453	0.029
NODAL 47	-41.86347	-66.93811	980172.107	0.029
NODAL 48	-42.05458	-71.16611	980137.607	0.029
NODAL 49	-40.76192	-71.64806	979998.183	0.029
NODAL 50	-41.25028	-68.69794	980019.047	0.026
NODAL 51	-41.32164	-69.50422	980021.652	0.024
NODAL 52	-40.79847	-62.98119	980228.753	0.020
NODAL 54	-40.67825	-66.16586	980156.602	0.029
NODAL 55	-40.58725	-67.75569	980021.983	0.018
NODAL 56	-40.32206	-68.97714	979887.223	0.027
NODAL 57	-40.04831	-70.07531	980031.110	0.022
NODAL 58	-41.12389	-70.72031	979988.321	0.030
NODAL 59	-40.10594	-64.45269	980165.003	0.026
NODAL 61	-39.08772	-66.52089	980012.001	0.023
NODAL 62	-38.95208	-68.05408	979963.811	0.017
NODAL 63	-38.90272	-70.06439	979784.883	0.023
NODAL 64	-38.91231	-70.72744	979631.771	0.030
NODAL 65	-38.99058	-64.09611	980047.637	0.017
NODAL 66	-38.83164	-64.93606	980010.990	0.030
NODAL 67	-38.72719	-62.25792	980069.477	0.018
NODAL 68	-38.71839	-61.28839	980012.345	0.021
NODAL 69	-38.38356	-60.27525	979973.990	0.018
NODAL 70	-38.16356	-58.78239	980002.721	0.021
NODAL 71	-37.99228	-57.55786	980018.278	0.028
NODAL 74	-37.54303	-64.35008	979890.172	0.018
NODAL 75	-37.45864	-61.93256	979875.011	0.019
NODAL 76	-37.31283	-59.98500	979879.244	0.023
NODAL 77	-37.32942	-59.13733	979905.287	0.020
NODAL 78	-37.09000	-57.87494	979926.641	0.028
NODAL 79	-37.32989	-65.65003	979828.140	0.026
NODAL 80	-37.34364	-67.61725	979799.922	0.021
NODAL 81	-37.18269	-68.40119	979674.732	0.026
NODAL 82	-37.39242	-69.92153	979599.528	0.019
NODAL 83	-37.68911	-63.16111	979927.666	0.021
NODAL 84	-36.89875	-60.32258	979873.035	0.023

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Grav. [mGal.]</b>	<b>Desv. Est. [mGal.]</b>
NODAL 86	-36.59931	-61.74739	979851.998	0.028
NODAL 87	-36.45925	-62.86292	979827.640	0.019
NODAL 89	-36.31519	-57.67539	979867.286	0.028
NODAL 90	-36.22778	-64.23375	979787.562	0.019
NODAL 91	-36.21647	-65.43653	979752.620	0.021
NODAL 91 ALC	-25.48806	-64.96778	978671.006	0.034
NODAL 92	-36.23322	-66.93914	979748.121	0.018
NODAL 93	-36.15489	-68.30294	979514.413	0.029
NODAL 94	-36.02156	-60.01483	979814.646	0.027
NODAL 95	-36.02147	-59.10003	979828.866	0.023
NODAL 97	-35.55489	-63.38008	979748.325	0.022
NODAL 98	-35.14300	-61.97000	979723.963	0.029
NODAL 99	-35.44014	-60.17219	979776.420	0.019
NODAL 100	-35.18567	-59.09808	979756.966	0.033
NODAL 101	-34.92181	-57.95453	979735.908	0.033
NODAL 103	-35.21361	-66.32761	979632.030	0.018
NODAL 104	-35.11247	-65.25472	979629.671	0.021
NODAL 105	-35.03814	-64.24636	979697.385	0.023
NODAL 106	-34.97722	-67.69678	979571.686	0.019
NODAL 107	-34.60764	-68.32942	979472.226	0.021
NODAL 108	-34.63919	-58.56486	979690.284	0.024
NODAL 109	-34.65281	-59.42475	979692.387	0.018
NODAL 110	-34.64222	-60.47181	979700.784	0.020
NODAL 111	-34.49781	-61.54275	979674.479	0.023
NODAL 112	-34.26211	-62.71036	979638.840	0.024
NODAL 114	-33.94281	-69.07858	979244.901	0.022
NODAL 116	-34.09517	-59.02442	979667.456	0.022
NODAL 117	-33.80708	-59.50192	979629.703	0.032
PF8N(82)C	-33.57561	-59.15794	979631.925	0.030
NODAL 119	-33.91556	-64.38964	979579.828	0.018
NODAL 120	-33.67472	-65.46211	979486.655	0.022
NODAL 121	-33.66172	-61.45656	979596.521	0.024
NODAL 122	-33.36719	-60.50958	979572.437	0.032
NODAL 123	-33.41594	-63.30308	979572.157	0.029
NODAL 124	-33.30761	-66.33533	979389.316	0.022
NODAL 126	-33.15086	-59.31089	979587.746	0.019
NODAL 127	-32.95675	-60.65567	979547.253	0.024
NODAL 128	-32.82136	-61.39525	979546.476	0.022
NODAL 129	-32.88636	-68.84656	979215.595	0.017
NODAL 131	-32.58878	-69.35461	978896.373	0.034
NODAL 132	-32.75931	-64.33431	979418.106	0.028
NODAL 133	-32.69775	-62.10606	979518.425	0.032
NODAL 134	-32.62189	-60.15789	979507.121	0.028
NODAL 135	-33.00803	-58.51156	979571.346	0.023
NODAL 136	-32.56094	-65.24428	979330.730	0.032
NODAL 137	-32.37539	-65.92983	979330.942	0.034
NODAL 138	-32.41472	-63.23444	979473.156	0.021

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Grav. [mGal.]</b>	<b>Desv. Est. [mGal.]</b>
NODAL 139	-32.38808	-67.01325	979330.822	0.034
NODAL 140	-31.73250	-60.52944	979437.652	0.022
NODAL 141	-31.64194	-60.70222	979449.086	0.019
NODAL 142	-31.62483	-58.50542	979440.651	0.019
NODAL 144	-31.51219	-59.83500	979412.066	0.038
NODAL 145	-31.53500	-68.53925	979166.868	0.018
NODAL 146	-31.46311	-67.35111	979259.798	0.039
NODAL 148	-31.37417	-65.29972	979182.661	0.028
NODAL 150	-31.44833	-63.19389	979400.066	0.023
NODAL 151	-31.40611	-61.99222	979400.980	0.021
NODAL 152	-31.44056	-61.25944	979420.460	0.026
NODAL 153	-31.33486	-69.42067	978938.521	0.039
NODAL 154	-30.89028	-63.25306	979348.680	0.023
NODAL 155	-30.57944	-65.72631	979275.985	0.021
NODAL 156	-30.63486	-67.46808	979156.587	0.033
NODAL 157	-30.74031	-59.64419	979367.663	0.025
NODAL 158	-30.58175	-59.92789	979359.132	0.025
NODAL 159	-30.76053	-57.98553	979358.643	0.022
NODAL 160	-30.42111	-64.34889	979198.500	0.025
NODAL 161	-30.38575	-58.75017	979350.424	0.028
NODAL 162	-30.31111	-61.24194	979327.638	0.018
NODAL 163	-30.24172	-68.74703	978929.928	0.029
NODAL 164	-30.15467	-66.54797	979204.233	0.035
NODAL 165	-29.90639	-63.71750	979229.206	0.025
NODAL 167	-29.31767	-68.22767	978874.727	0.025
NODAL 168	-29.29531	-67.48028	978944.708	0.029
NODAL 169	-29.41311	-66.85611	979042.606	0.020
NODAL 170	-28.85309	-66.23788	979043.833	0.024
NODAL 171	-28.93222	-65.09694	979169.328	0.033
NODAL 172	-29.12842	-60.14781	979242.269	0.029
NODAL 173	-29.14417	-59.64278	979253.075	0.022
NODAL 174	-29.14378	-59.26564	979249.654	0.022
NODAL 175	-29.18506	-58.07336	979239.086	0.020
NODAL 176	-29.17806	-56.63786	979240.089	0.020
NODAL 177	-28.75372	-68.20456	978668.084	0.039
NODAL 178	-28.62972	-63.95917	979178.780	0.028
NODAL 179	-28.60361	-62.95167	979198.233	0.026
NODAL 180	-28.66778	-61.52861	979211.613	0.030
NODAL 181	-30.32275	-69.20403	978746.264	0.039
NODAL 182	-27.98064	-55.52125	979110.722	0.019
NODAL 183	-27.95477	-65.16604	979050.627	0.023
NODAL 184	-27.78389	-64.25472	979077.425	0.029
NODAL 186	-27.64925	-67.02653	978685.651	0.023
NODAL 187	-27.58325	-66.31575	978742.400	0.030
NODAL 188	-27.57639	-60.71111	979121.921	0.019
NODAL 189	-27.65472	-59.09472	979135.261	0.029
NODAL 190	-27.45083	-58.98389	979132.806	0.020

<b>Nombre</b>	<b>Latitud [°]</b>	<b>Longitud [°]</b>	<b>Grav. [mGal.]</b>	<b>Desv. Est. [mGal.]</b>
NODAL 192	-27.58500	-56.68736	979123.137	0.024
NODAL 193	-27.42569	-57.33842	979126.180	0.022
NODAL 194	-27.36625	-55.89419	979094.716	0.028
NODAL 195	-27.64472	-62.41722	979123.657	0.020
NODAL 196	-27.29581	-54.19592	979034.108	0.021
NODAL 197	-26.79111	-60.44083	979059.609	0.022
NODAL 198	-26.83292	-65.19322	978891.560	0.020
NODAL 199	-26.69250	-66.04750	978463.015	0.030
NODAL 200	-26.58417	-62.84722	979011.317	0.032
NODAL 201	-26.30806	-61.65528	979021.254	0.022
NODAL 202	-26.18500	-58.17361	979025.005	0.022
NODAL 203	-26.39333	-64.50306	978920.777	0.034
NODAL 204	-26.05917	-67.40639	978025.560	0.033
NODAL 206	-25.80361	-62.83056	978965.700	0.022
NODAL 207	-25.59731	-54.57708	978915.714	0.020
NODAL 208	-25.70139	-60.19667	978989.587	0.029
NODAL 209	-25.61500	-63.26472	978928.676	0.021
NODAL 210	-25.48417	-64.97028	978671.221	0.019
NODAL 211	-25.43722	-66.29444	978296.572	0.034
NODAL 212	-25.11722	-64.12417	978836.789	0.022
NODAL 213	-25.33278	-59.68194	978964.122	0.020
NODAL 214	-25.28694	-57.71778	978975.504	0.029
NODAL 215	-25.72031	-61.11036	978985.519	0.029
NODAL 216	-25.16139	-61.84111	978936.298	0.027
NODAL 217	-24.55139	-59.38528	978903.564	0.029
NODAL 218	-24.43028	-63.99472	978778.465	0.026
NODAL 219	-24.37583	-65.11806	978563.303	0.019
NODAL 220	-24.37278	-66.99222	977805.198	0.040
NODAL 221	-24.25417	-61.24444	978880.072	0.032
NODAL 222	-24.21694	-66.31917	977814.193	0.037
NODAL 223	-24.18472	-62.88806	978839.218	0.033
NODAL 225	-23.86806	-60.87389	978843.390	0.029
NODAL 228	-23.61056	-62.59306	978791.607	0.029
NODAL 229	-23.32889	-64.22778	978675.122	0.019
NODAL 230	-23.18556	-62.30639	978770.321	0.033
NODAL 231	-22.51250	-63.81111	978585.039	0.030
NODAL 232	-22.27222	-62.71194	978698.021	0.033
NODAL 235	-30.71361	-62.00083	979339.569	0.030
NODAL 236	-28.39294	-57.88736	979188.496	0.025
NODAL 237	-28.13750	-58.76833	979165.440	0.017
NODAL 238	-28.55039	-56.03475	979180.550	0.020
NODAL 239	-28.28697	-56.77836	979178.998	0.025
NODAL 240	-26.71194	-58.66833	979070.793	0.026
NODAL 241	-26.71492	-54.80583	978996.600	0.022
NODAL 242	-26.25547	-53.64678	978807.611	0.024
NODAL 244	-39.95117	-71.07058	979925.882	0.031
PF11N(254)	-35.19936	-69.64550	979259.956	0.020

Nombre	Latitud [°]	Longitud [°]	Grav. [mGal.]	Desv. Est. [mGal.]
PF13N(89)	-32.81408	-70.04847	978643.780	0.030
PF1N(142)	-42.02983	-65.07144	980341.515	0.020
PF1N(219)	-44.66244	-66.59617	980485.596	0.023
PF2N(120)	-39.26936	-65.60792	980058.980	0.024
PF3N(171)	-31.33247	-66.50975	979263.790	0.033
PF3N(204)	-34.44783	-66.30056	979537.275	0.026
PF3N(259)	-33.33747	-67.95864	979410.309	0.034
PF44N(168)	-27.44389	-58.74408	979137.544	0.035
PF47N(394)	-22.75083	-65.68389	977822.284	0.038
PF4N(310)	-40.49244	-70.67903	980010.136	0.030
PF5N(141)	-40.74553	-65.07631	980218.072	0.018
PF64N(170)	-31.41972	-64.19861	979326.564	0.030
PF87N(143)	-38.12253	-65.96750	979925.829	0.030
PGBA	-34.57356	-58.51964	979688.446	0.016
CATR	-37.87231	-67.71325	979866.116	0.018
CRES	-29.86833	-62.02111	979311.131	0.030
SQES	-23.39919	-66.36564	977799.760	0.032

La Figura 6.1 muestra el histograma de los residuos obtenidos del ajuste.

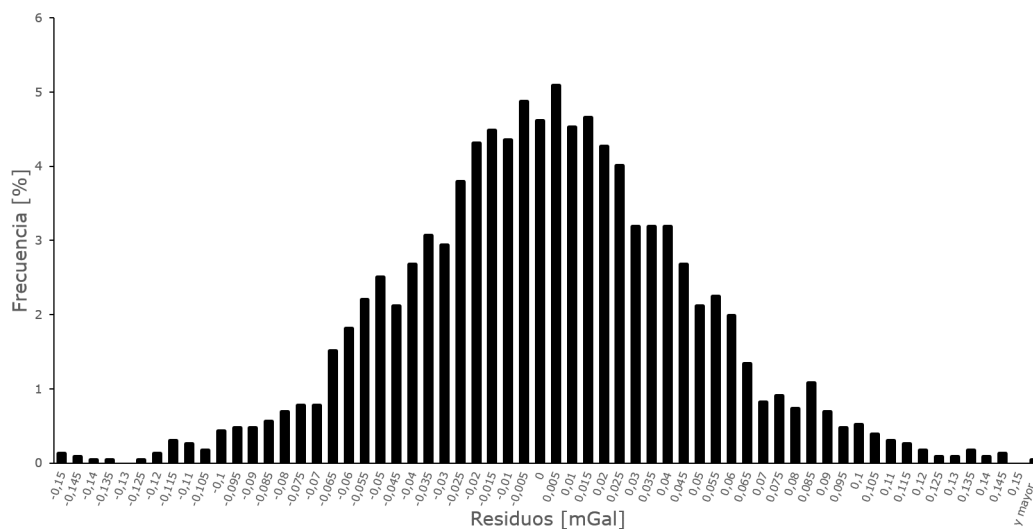


Figura 6.1: Histograma de residuos obtenidos del ajuste

Como se puede ver a partir del histograma de residuos, no existe un sesgo apreciable de los mismos. Esto permite concluir que los resultados muestran un correcto acuerdo interno de las observaciones.

## 6.2. Análisis de los Resultados

### 6.2.1. Consistencia de la RPO-Ar

La Tabla 6.2 muestra los valores estadísticos que surgen del ajuste por mínimos cuadrados de las observaciones gravimétricas. El desvío estándar promedio de los 227 puntos que componen la red 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, los cuales tenían un promedio de 0.085 mGal y muestran una notable consistencia interna de la red.

Tabla 6.2: Estadísticas de los resultados obtenidos

<b>Desvío Estándar Máximo [mGal]</b>	<b>Desvío Estándar Mínimo [mGal]</b>	<b>Desvío Estándar Promedio [mGal]</b>
0.040	0.016	0.025

Con el fin de evaluar la consistencia de la nueva red con respecto a los puntos de la red RAGA, se realizaron tres experimentos. En cada experimento se utilizaron 28 puntos de la red RAGA como puntos de referencia y se analizaron los valores de gravedad ajustados para los 5 puntos restantes. Se consideraron 5 puntos distintos en cada experimento seleccionados de forma geográfica pero sin dejar ninguna zona sin algún punto de referencia.

En la Tabla 6.3 se pueden ver los puntos considerados para el análisis en cada experimento, su gravedad absoluta (RAGA), las gravedades obtenidas a partir del ajuste y sus diferencias.



Tabla 6.3: Diferencias entre gravedad absoluta (RAGA) y la gravedad ajustada para cada experimento

<b>Experimento 1</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Gravedad RAGA [mGal]</b>	<b>Gravedad Ajustada [mGal]</b>	<b>Diferencias [mGal]</b>
SMTU	978886.042	978886.062	-0.020
MERS	979239.943	979239.949	-0.006
ESQE	980231.722	980231.691	0.031
PERI	980624.557	980624.559	-0.002
ZOND	979141.679	979141.689	-0.010
<b>Experimento 2</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Gravedad RAGA [mGal]</b>	<b>Gravedad Ajustada [mGal]</b>	<b>Diferencias [mGal]</b>
CORI	980663.760	980663.716	0.044
SANL	979165.409	979165.429	-0.020
RIOJ	979042.376	979042.400	-0.024
VICA	979752.736	979752.731	0.005
SCRI	979327.540	979327.518	0.022
<b>Experimento 3</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Gravedad RAGA [mGal]</b>	<b>Gravedad Ajustada [mGal]</b>	<b>Diferencias [mGal]</b>
VMAR	979473.584	979473.617	-0.033
PAYS	979523.523	979523.512	0.011
SANE	979123.329	979123.357	-0.028
LYEM	978882.640	978882.639	0.001
GGIL	979517.779	979517.731	0.048

Estos resultados ponen de manifiesto que existe un gran acuerdo entre las observaciones involucradas y la red RAGA y que la exactitud de esta nueva red es de  $\pm 0.023$  mGal (desvío estándar de las diferencias obtenidas en la Tabla 6.3).

Otro análisis que se realizó con el fin de validar la consistencia interna de la RPO-Ar fue realizar el ajuste de la totalidad de los puntos que la componen a un único punto RAGA. Esto resulta en 35 experimentos que permiten analizar la geometría de la red. En la Figura 6.2 se puede ver la estadística resultante del ajuste con los 33 puntos RAGA y la de cada experimento. La columna azul muestra el máximo de los desvíos estándar, la columna naranja es el mínimo y la de color gris el promedio.

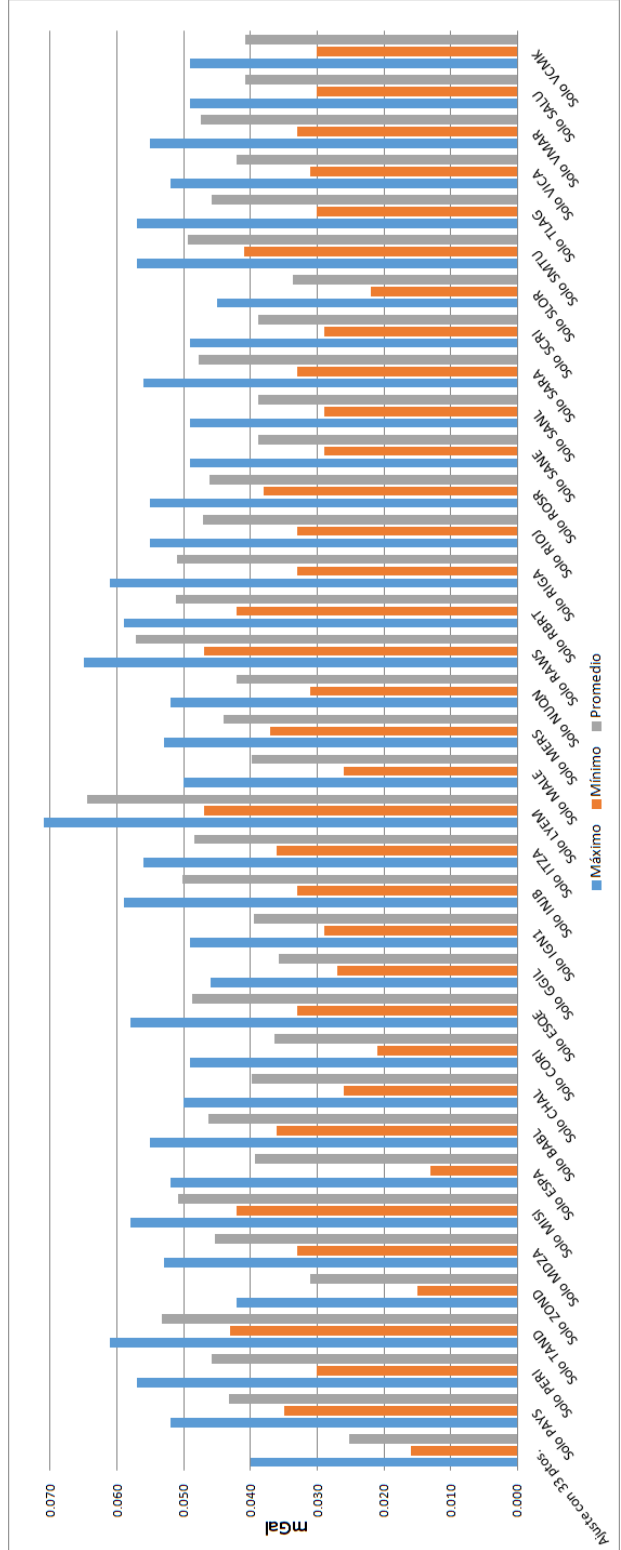


Figura 6.2: Estadística de cada experimento

La Figura 6.2 muestra qué tan bien se comporta la geometría de la RPO-Ar en función de la ubicación de cada punto de referencia y sus vinculaciones. Para la mayor parte de los puntos, la geometría se comporta de manera similar. De igual manera, existen puntos que muestran una mala geometría, como por ejemplo LYEM, el cual se encuentra en la provincia de Formosa. Así también podemos notar que ajustando la RPO-Ar al punto ZOND, la geometría resulta ser muy buena.

A raíz de esto se decidió realizar dos experimentos más, buscando analizar qué sucedía con el ajuste de la red. Estos experimentos consistieron en:

- 1 Ajustar la totalidad de la RPO-Ar a aquellos cinco puntos de referencia que reflejan la mejor geometría. Los puntos elegidos fueron: CHAL,CORI, SLOR, ESPA, CORI; y
- 2 Ajustar la totalidad de la RPO-Ar eliminando aquellos puntos que presentan una mala geometría. El criterio utilizado para eliminar puntos de referencia fue analizar el máximo de los desvíos estándar obtenidos de cada experimento. Se eliminaron aquellos puntos cuyo desvío estándar máximo superaba los 0.057 mGal. Los puntos que cumplían esta condición y, por lo tanto, fueron eliminados como puntos de referencia fueron: TAND, LYEM, RAWES, RIGA, MISI, ESQE, INJB, RBRT.

La estadística de los resultados obtenidos de estas nuevas pruebas se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Estadística de los resultados obtenidos de los dos experimentos

	<b>Máximo</b> [mGal]	<b>Mínimo</b> [mGal]	<b>Promedio</b> [mGal]
<b>Ajuste Completo</b>	0.040	0.016	0.025
<b>Ajuste Mejores 5</b>	0.043	0.020	0.029
<b>Ajuste 33 Menos los Peores</b>	0.041	0.017	0.026

Los resultados expuestos en la Tabla 6.4 permiten concluir que los resultados finales no mejoran si se sólo se utilizan los puntos de referencia que reflejan una buena geometría. Por otra parte, es importante incluir los puntos de referencia con una mala geometría. Sería interesante en el futuro considerar mejorar la geometría de la red y sus vinculaciones a la red RAGA generando nuevos circuitos entre puntos que no estén vinculados. Esto es posible verlo en la Figura 4.1 (Capítulo 4) ya que existen puntos con una única vinculación al resto de la red.

### 6.2.2. Comparación con Antiguos Valores de Gravedad

En la Tabla 6.5 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 6.5: Diferencias entre los valores de gravedad históricos y los que surgen de la nueva Red Gravimétrica de Primer Orden

<b>Nombre</b>	<b>Diferencia [mGal]</b>	<b>Nombre</b>	<b>Diferencia [mGal]</b>
NODAL 2	-0.572	NODAL 52	-0.013
NODAL 3	-0.511	NODAL 54	16.208
NODAL 4	-0.471	NODAL 55	0.057
NODAL 5	-0.636	NODAL 56	-0.833
NODAL 6	-0.433	NODAL 57	-0.330
NODAL 7	-0.378	NODAL 58	0.429
NODAL 8	-0.378	NODAL 59	-0.073
NODAL 9	-0.390	NODAL 61	1.289
NODAL 10	-0.415	NODAL 62	2.279
NODAL 11	-0.423	NODAL 63	-0.263
NODAL 12	-0.365	NODAL 64	25.529
NODAL 13	-0.593	NODAL 65	0.383
NODAL 14	-0.525	NODAL 66	0.860
NODAL 15	-0.766	NODAL 67	-0.027
NODAL 16	-0.551	NODAL 68	-0.245
NODAL 19	-0.690	NODAL 121	-0.081
NODAL 20	-0.617	NODAL 122	-0.287
NODAL 21	-0.888	NODAL 123	0.043
NODAL 22	-0.629	NODAL 124	-0.466
NODAL 23	-0.489	NODAL 126	-0.136
NODAL 24	-0.371	NODAL 127	-0.293
NODAL 26	1.326	NODAL 128	-0.276
NODAL 27	-3.069	NODAL 129	-0.235
NODAL 29	-1.120	NODAL 131	-0.643
NODAL 32	0.016	NODAL 132	-0.796
NODAL 33	-0.769	NODAL 133	-0.345
NODAL 35	—	NODAL 134	-0.931
NODAL 36	-0.050	NODAL 135	-0.196
NODAL 37	-0.164	NODAL 136	-1.740
NODAL 40	-0.441	NODAL 137	-0.652
NODAL 41	-0.695	NODAL 138	-0.196
NODAL 42	-0.482	NODAL 139	-0.242
NODAL 43	-0.321	NODAL 140	-0.852
NODAL 44	-0.673	NODAL 141	-0.376
NODAL 46	-0.353	NODAL 142	0.049
NODAL 47	-0.267	NODAL 144	-0.406
NODAL 48	-0.497	NODAL 145	-0.458
NODAL 49	2.917	NODAL 146	-0.358
NODAL 50	0.073	NODAL 148	-1.641
NODAL 51	0.058	NODAL 150	-0.576
		NODAL 151	-0.730
		NODAL 152	-0.690
		NODAL 153	-0.661
		NODAL 154	-0.660

Nombre	Diferencia [mGal]	Nombre	Diferencia [mGal]
NODAL 155	-0.195	NODAL 101	0.232
NODAL 156	-0.267	NODAL 103	-0.310
NODAL 157	-0.433	NODAL 104	-0.171
NODAL 158	-0.642	NODAL 105	0.045
NODAL 159	0.257	NODAL 106	-0.286
NODAL 160	-1.120	NODAL 107	-0.436
NODAL 161	-0.164	NODAL 108	0.126
NODAL 162	-0.148	NODAL 109	0.033
NODAL 163	-0.448	NODAL 110	0.066
NODAL 164	-0.033	NODAL 111	0.071
NODAL 165	-1.416	NODAL 112	0.050
NODAL 167	-0.207	NODAL 114	-0.241
NODAL 168	-0.938	NODAL 116	-0.106
NODAL 169	0.104	NODAL 117	0.147
NODAL 170	0.087	PF8N(82)C	—
NODAL 171	0.112	NODAL 119	-0.058
NODAL 69	0.160	NODAL 120	0.075
NODAL 70	0.069	NODAL 172	-0.059
NODAL 71	0.262	NODAL 173	-0.505
NODAL 74	0.618	NODAL 174	-0.424
NODAL 75	0.569	NODAL 175	-3.666
NODAL 76	0.216	NODAL 176	0.731
NODAL 77	0.123	NODAL 177	-1.094
NODAL 78	0.159	NODAL 178	-1.460
NODAL 79	0.420	NODAL 179	-0.253
NODAL 80	1.098	NODAL 180	-0.053
NODAL 81	-0.432	NODAL 181	-0.424
NODAL 82	-0.108	NODAL 182	-0.212
NODAL 83	0.924	NODAL 183	0.003
NODAL 84	-0.095	NODAL 184	0.045
NODAL 86	0.562	NODAL 186	-0.711
NODAL 87	0.760	NODAL 187	-1.030
NODAL 89	0.224	NODAL 188	-0.151
NODAL 90	0.498	NODAL 189	-0.051
NODAL 91	0.250	NODAL 190	-0.016
NODAL 91 ALC	—	NODAL 192	-0.317
NODAL 92	-0.011	NODAL 193	-0.140
NODAL 93	-0.313	NODAL 194	-0.326
NODAL 94	0.014	NODAL 195	-0.107
NODAL 95	0.134	NODAL 196	-0.218
NODAL 97	0.575	NODAL 197	-0.079
NODAL 98	0.357	NODAL 198	0.110
NODAL 99	0.060	NODAL 199	-0.395
NODAL 100	0.264	NODAL 200	-0.157

Nombre	Diferencia [mGal]
NODAL 201	-0.134
NODAL 202	-0.105
NODAL 203	-1.187
NODAL 204	-1.230
NODAL 206	-0.120
NODAL 207	-0.144
NODAL 208	-0.147
NODAL 209	-0.596
NODAL 210	-0.251
NODAL 211	-0.332
NODAL 212	-0.219
NODAL 213	-0.102
NODAL 214	-0.184
NODAL 215	-0.139
NODAL 216	0.012
NODAL 217	-0.054
NODAL 218	-0.505
NODAL 219	-0.303
NODAL 220	0.002
NODAL 221	-0.122
NODAL 222	0.007
NODAL 223	-0.148
NODAL 225	-0.120
NODAL 228	-0.047
NODAL 229	-0.052
NODAL 230	-0.001
NODAL 231	-0.349
NODAL 232	0.059
NODAL 235	-4.309
NODAL 236	2.064
NODAL 237	-0.170
NODAL 238	0.470
NODAL 239	-2.288
NODAL 240	-0.343
NODAL 241	-0.330
NODAL 242	-0.221
NODAL 244	31.418
PF11N(254)	-0.366
PF13N(89)	-1.350
PF1N(142)	-0.465
PF1N(219)	0.174
PF2N(120)	1.390
PF3N(171)	-0.350
PF3N(204)	-0.495

Nombre	Diferencia [mGal]
PF3N(259)	-0.339
PF44N(168)	-0.264
PF47N(394)	—
PF4N(310)	-10.836
PF5N(141)	-0.442
PF64N(170)	1.136
PF87N(143)	—
SQES	—
PGBA	—
CATR	—
CRES	—

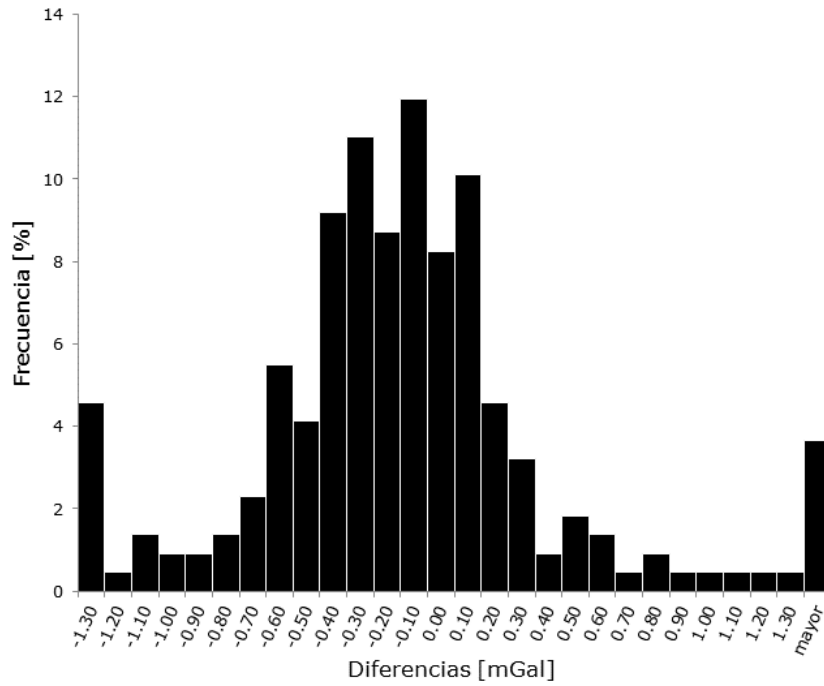


Figura 6.3: Histograma de las diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas

Se lograron calcular diferencias entre las gravedades históricas y las nuevas de doscientos diecinueve puntos. El promedio de dichas diferencias es de  $-0.087$  mGal habiendo eliminado de dicho promedio aquellos puntos con diferencias demasiado grandes. Este sesgo que puede verse también en el histograma puede deberse a que las gravedades históricas han sido transformadas del sistema Potsdam al sistema IGSN71 aplicando una transformación constante a todos los valores.

Existen cuatro puntos que exceden los 4 mGal [nadales 54, 64, 244, y PF4N(310)]. Éstas diferencias se deben principalmente a que las gravedades históricas de los nadales 54, 64, 244, y el punto PF4N(310) corresponden a gravedades interpoladas (no han sido medidas con gravímetros).

## Capítulo 7

# Conclusiones

Las observaciones gravimétricas llevadas a cabo por el Instituto Geográfico Nacional entre los años 2012 y 2015 permitieron establecer una nueva Red Gravimétrica de Primer Orden para la República Argentina que reemplaza a la antigua red BACARA.

La reducción de las observaciones gravimétricas debido al efecto de mareas terrestres se llevó a cabo mediante el modelo teórico propuesto por Cartwright y Edden (1973) utilizando el software GRAVDATA (Drewes, 1978). Por otra parte, el ajuste de la nueva red gravimétrica fue obtenido mediante el método de mínimos cuadrados, utilizando 33 valores de gravedad de la red RAGA como puntos de referencia y el programa GRADJ (Andersen y Forsberg, 1996).

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 0.025 mGal y un desvío estándar máximo de 0.040 mGal mostrando así un gran acuerdo interno entre las observaciones.

A modo de experiencia, se ajustó la totalidad de los puntos de la red a cada punto RAGA con el fin de analizar el comportamiento de la geometría de la red con respecto a cada punto de control. Se concluyó de tal experiencia que el mejor ajuste se obtiene utilizando los 33 puntos de gravedad absoluta como puntos de control. Por otro lado, el análisis de los resultados permitieron asegurar una gran consistencia con respecto a la red RAGA y estimar una exactitud de  $\pm 0.023$  mGal.

La antigua red BACARA contaba con un total de 86 puntos y desvíos estándar promedio de 0.085 mGal. En este sentido, se ha logrado obtener una nueva red considerablemente más homogénea y precisa. Por otra parte, se calcularon las diferencias entre las gravedades nuevas y las antiguas. El promedio de dichas diferencias es de  $-0.087$  mGal. El sesgo en las diferencias puede deberse a que las antiguas gravedades fueron transformadas del sistema Potsdam al sistema IGSN71.

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

Cabe destacar que el día 2 de diciembre de 2016 el Instituto Geográfico Nacional ha decidido publicar y oficializar las gravedades obtenidas en el desarrollo de este trabajo por lo que los resultados anteriormente presentados forman parte del nuevo Marco Gravimétrico Nacional de la República Argentina. Ver enlace: <http://www.ign.gob.ar/content/oficializaci%C3%B3n-del-nuevo-sistema-vertical-de-referencia-nacional>



A futuro, sería importante considerar mejorar la geometría de la red, buscando realizar más vinculaciones entre puntos que no las tienen o que quedan aislados con respecto al resto de la red. Por otra parte, no existen vinculaciones realizadas a puntos en la provincia de Tierra del Fuego, lo cual representa un importante trabajo a realizar. Por último, los resultados expuestos en este trabajo muestran una inconsistencia con respecto a dos puntos de la red RAGA. Sería conveniente considerar remedir estos dos puntos de gravedad absoluta para corroborar si existe algún problema con los valores actualmente publicados.

## Anexo – Tablas de Conversión de Lecturas de Gravímetros LaCoste & Romberg

	L&R G-043		L&R G-069		L&R G-673	
0	0.00	1.04600	0.00	1.02935	0.00	1.02235
100	104.60	1.04580	102.94	1.02932	102.24	1.02208
200	209.18	1.04560	205.87	1.02930	204.44	1.02186
300	313.74	1.04535	308.80	1.02927	306.68	1.02167
400	418.28	1.04510	411.72	1.02925	408.80	1.02147
500	522.79	1.04470	514.65	1.02925	510.94	1.02129
600	627.26	1.04455	617.57	1.02923	613.97	1.02112
700	731.71	1.04465	720.50	1.02921	715.12	1.02098
800	836.18	1.04530	823.42	1.02922	817.22	1.02084
900	940.71	1.04525	926.34	1.02922	919.37	1.02070
1000	1045.23	1.04520	1029.26	1.02923	1021.44	1.02056
1100	1149.75	1.04515	1132.19	1.02925	1123.49	1.02044
1200	1254.27	1.04515	1235.11	1.02928	1225.54	1.02035
1300	1358.78	1.04515	1338.04	1.02933	1327.57	1.02022
1400	1463.29	1.04525	1440.97	1.02938	1429.60	1.02024
1500	1567.82	1.04535	1543.91	1.02945	1531.62	1.02020
1600	1672.35	1.04545	1646.85	1.02956	1633.64	1.02018
1700	1776.90	1.04550	1749.81	1.02971	1735.66	1.02017
1800	1881.45	1.04555	1852.78	1.02985	1837.68	1.02017
1900	1986.00	1.04560	1955.77	1.02995	1939.70	1.02017
2000	2090.56	1.04560	2058.76	1.03000	2041.71	1.02018
2100	2195.12	1.04565	2161.76	1.03001	2143.73	1.02018
2200	2299.69	1.04575	2264.76	1.03005	2245.75	1.02017
2300	2404.26	1.04580	2367.77	1.03012	2347.77	1.02018
2400	2508.84	1.04585	2470.78	1.03024	2449.76	1.02020
2500	2613.43	1.04590	2573.80	1.03039	2555.18	1.02022
2600	2718.02	1.04600	2676.84	1.03057	2653.83	1.02027
2700	2822.61	1.04605	2779.90	1.03079	2755.85	1.02031
2800	2927.22	1.04615	2882.98	1.03105	2857.88	1.02037
2900	3031.83	1.04625	2986.08	1.03127	2959.92	1.02042
3000	3136.46	1.04635	3089.21	1.03143	3061.06	1.02050
3100	3241.10	1.04650	3192.35	1.03153	3164.01	1.02057
3200	3345.75	1.04660	3295.51	1.03163	3266.07	1.02065
3300	3450.41	1.04670	3398.67	1.03170	3368.13	1.02072
3400	3555.08	1.04685	3501.84	1.03177	3470.21	1.02078
3500	3659.76	1.04695	3605.02	1.03180	3572.28	1.02085
3600	3764.45	1.04700	3708.20	1.03185	3674.37	1.02092
3700	3869.15	1.04710	3811.38	1.03207	3776.46	1.02101
3800	3973.86	1.04715	3914.59	1.03233	3878.56	1.02107
3900	4078.58	1.04725	4017.82	1.03254	3980.67	1.02113
4000	4183.30	1.04725	4121.08	1.03272	4082.78	1.02119
4100	4288.03	1.04725	4224.35	1.03284	4184.90	1.02124
4200	4392.75	1.04715	4327.63	1.03294	4287.03	1.02129
4300	4497.47	1.04715	4430.93	1.03302	4389.15	1.02136

	<b>L&amp;R G-043</b>		<b>L&amp;R G-069</b>		<b>L&amp;R G-673</b>	
4400	4602.19	1.04720	4534.23	1.03307	4491.29	1.02141
4500	4706.90	1.04735	4637.53	1.03307	4593.43	1.02145
4600	4811.64	1.04765	4740.84	1.03307	4695.58	1.02143
4700	4916.40	1.04775	4844.15	1.03313	4797.72	1.02152
4800	5021.18	1.04780	4947.46	1.03323	4899.88	1.02153
4900	5125.96	1.04780	5050.78	1.03339	5002.03	1.02154
5000	5230.74	1.04770	5154.12	1.03350	5104.18	1.02156
5100	5335.51	1.04765	5257.47	1.03357	5206.34	1.02156
5200	5440.28	1.04760	5360.83	1.03359	5308.50	1.02154
5300	5545.04	1.04760	5464.19	1.03357	5410.65	1.02152
5400	5649.80	1.04760	5567.55	1.03353	5512.80	1.02149
5500	5754.56	1.04770	5670.90	1.03345	5614.95	1.02147
5600	5859.33	1.04780	5774.24	1.03334	5717.10	1.02142
5700	5964.11	1.04780	5877.58	1.03319	5819.24	1.02137
5800	6068.89	1.04780	5980.90	1.03307	5921.38	1.02137
5900	6173.67	1.04775	6084.20	1.03302	6023.51	1.02129
6000	6278.45	1.04775	6187.51	1.03299	6125.63	1.02122
6100	6383.22	1.04765	6290.81	1.03290	6227.74	1.02113
6200	6487.99	1.04760	6394.10	1.03277	6329.84	1.02103
6300	6592.75	1.04745	6497.37	1.03261	6431.93	1.02090
6400	6697.49	1.04725	6600.63	1.03242	6534.01	1.02077
6500	6802.22	1.04705	6703.88	1.03220	6636.07	1.02063
6600	6906.92	1.04680	6807.10	1.03197	6738.12	1.02048
6700	7011.60	1.04655	6910.29	1.03170	6840.15	1.02032
6800	7116.26	1.04625	7013.46	1.03140	6942.17	1.02017
6900	7220.88	1.04600	7116.60	1.03110	7044.17	1.02000
7000	7325.48		7219.71		7146.15	1.01988

## Referencias

- Andersen, O. B., & Forsberg, R. (1996). Danish precision gravity reference network (Vol. 4). Kort & matrikelstyrelsen.
- 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. Trabajo presentado en la 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.
- Billesfeld, F.-J. (1985). Ein Beitrag zur harmonischen Darstellung des zeitenerzeugenden 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.
- Furones, Á. M., Julián, A. B. A., & Devesa, J. P. (2003). Correcciones por efecto de marea a observables geodésicos y gravimétricos de alta precisión. *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 20(118), 56-64.
- Gemael, C. (1994). Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas: Editora UFPR.
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy* Wh Freeman and Co. San Francisco.
- Instituto Geográfico Militar. (1970). Informe nacional de actividades gravimétricas para el período 1965-1970. Trabajo presentado en la 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.
- LaCoste Jr, L. J. (1934). A new type long period vertical seismograph. *Physics*, 5(7), 178-180.
- 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. Acta 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 (IGSN71): DTIC Document.
- Munk, W. H., & Cartwright, D. E. (1966). Tidal spectroscopy and prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 259(1105), 533-581.

- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica* (“Mathematical principles of natural philosophy”). London.
- 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. Trabajo presentado en la 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](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., & Müller, J. (2012). *Geodesy*. 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.
- Wenzel, H. G. (1997). Tide-generating potential for the Earth. In *Tidal Phenomena* (pp. 9-26). Springer Berlin Heidelberg.
- Wolf, P., & Ghilani, C. (2006). *Adjustment Computations Spatial Data Analysis*: Hoboken.