

USO DE VALORES ABSOLUTOS DE ACELERACIÓN DE GRAVEDAD PARA EL FACTOR DE ESCALA DE GRAVÍMETROS LACOSTE&ROMBERG MODELO G.

USE OF ABSOLUTE VALUES OF ACCELERATION OF GRAVITY TO OBTAIN THE SCALE FACTOR OF LACOSTE&ROMBERG MODEL G GRAVIMETERS.

Sr. Denizar Blitzkow¹ y Sr. Germán Aguilera Reyes²

RESUMEN

El Instituto Geográfico Militar (IGM) tiene como deber mantener y actualizar el sistema de referencia geodésico oficial del país, materializado por la Red Geodésica Nacional (RGN), la que se encuentra conformada por la RGN Horizontal y Vertical. Esta última, la componen la Red de Nivelación materializada por puntos con altura referida al nivel medio del mar (n.m.m.) y la Red Gravimétrica compuesta por estaciones absolutas y relativas, con valores de aceleración de gravedad (g), referidos al International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN-71), adoptado como referencia mundial para las mediciones gravimétricas en la XXV Asamblea General de la International Unión of Geodesy and Geophysics (IUGG) de 1971, con una precisión de $\pm 0,1$ mGal. El presente trabajo investigativo pone énfasis en dar a conocer las principales características de funcionamiento y el correcto uso del instrumento de medición de la aceleración de gravedad (g), que el IGM utiliza para sus proyectos gravimétricos, para ello da a conocer el procedimiento de calibración instrumental, obteniendo un factor de escala para cada gravímetro Lacoste&Romberg modelo G, con el fin de obtener valores de aceleración gravedad más precisos. Lo anterior se sustenta ante los requerimientos sugeridos por organismos internacionales del ámbito de la geodesia, como lo es la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y SIRGAS, que promueven e instan a los países a implementar sistemas verticales de referencia globales homogéneos y precisos, donde la gravimetría es un factor primordial para generar un nuevo marco de referencia vertical para el país, adoptando alturas físicas.

Palabras claves: Gravedad, aceleración, factor de escala.

ABSTRACT

The Military Geographic Institute (IGM) is the institution responsible for maintaining and updating the official geodesic reference system of Chile put into effect through the National Geodesic Network (RGN), which consists of the Horizontal and Vertical RGNs. This latter element is made up of the leveling network, constituted by altitude points referenced to the Mean Sea Level (M.S.L.) and the Gravimetric Network, consisting of absolute and relative stations, with gravity acceleration values (g), referenced to the International Gravity Standardization Network 1971 (IGSN-71). The IGSN-71 was adopted as the world reference for gravimetric measurement at the 25th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) in 1971 with a precision of $\pm 0,1$ mGal. This current research work is mainly focused on making known the chief features of the operation and correct use of the instrument measuring the gravity acceleration (g) that the IGM uses for its gravimetric projects. The instrumental calibration procedure is made known here, obtaining the "scale" (adjustment) factor for each Lacoste&Romberg model G gravimeter in order to obtain more accurate gravity values. The above is sustained in relation to the requirements suggested by international organisations in the area of geodesy, such as the International Association of Geodesy (IAG) and SIRGAS, which encourage all nations to implement homogeneous and precise global vertical reference systems, in which gravimetry is an essential factor in setting up a new vertical reference frame for the whole country, adopting physical heights.

Keywords: gravity, acceleration, scale factor.

¹ Universidad de Sao Paulo, Brasil.

² Instituto Geográfico Militar de Chile.

Fecha de recepción: 09 de Septiembre de 2022.

Fecha de aprobación: 08 de Noviembre de 2022.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de información gravimétrica en el país y en Sudamérica, orientada principalmente a la unificación de sistemas altimétricos, ha significado para el IGM, desde el punto de vista técnico y operativo, ejecutar dos tipos de trabajos de gravimetría, a objeto de obtener valores de aceleración de gravedad (g) para ser utilizados en la adopción de alturas físicas.

El primer trabajo es realizar un levantamiento gravimétrico, el que consiste en medir, en una zona específica, una red de puntos cada 5 km con el objeto de hacer densificaciones de gravedad, o bien para materializar estaciones al Sistema Internacional de Alturas (IHRG/IHRF).

El segundo trabajo se basa en establecer líneas de nivelación, para actualizar el marco de referencia vertical referido al nivel medio del mar (n.m.m.), además se generan datos combinados de GNSS y aceleración de gravedad (g), los que son utilizados para elaborar modelos geoidales.

En este contexto se hace indispensable la mantención y el correcto uso de los equipos de gravedad utilizados en los trabajos anteriormente señalados. El IGM posee el gravímetro marca Lacoste&Romberg (L&R) modelo G, precisamente, el G-50 y G-61.

Posteriormente, en la sección geodésica del IGM, son procesadas y calculadas las lecturas gravimétricas con el objeto de obtener valores de aceleración de gravedad (g) de dichos trabajos.



Imagen 1: Muestra gravímetros L&R modelo G-61 y G-50 utilizados por el IGM. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

ASPECTOS GENERALES DE LOS GRAVÍMETROS LACOSTE&ROMBERG (L&R) MODELO G

El L&R modelo G es un instrumento que está confeccionado con una parte interna y otra externa. En esta última es donde se realiza la manipulación y operatividad del instrumento; en la otra es donde se ubica todo el mecanismo interno de funcionamiento.

La parte exterior del gravímetro es la superior, donde se ubican sus componentes de operatividad, con las que se realizan las lecturas gravimétricas en el campo, entre ellos se encuentran el tornillo micrométrico, lente ocular, tornillo sujetador de frenado, niveles de burbujas y contador de lectura.

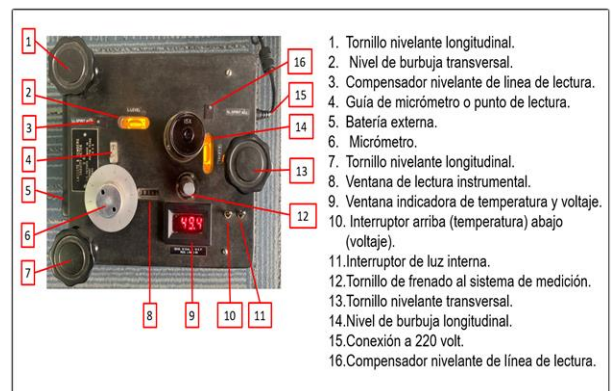


Imagen 2: Muestra los componentes externos de operatividad en la parte superior del gravímetro L&R modelo G. Fuente: IGM, 2022.

La parte interna del L&R es una caja sellada donde se encuentra el engranaje de funcionamiento con todos sus componentes metálicos, debido a esto existe un compresor de presión, el que se encuentra desmagnetizado, generando un blindaje magnético. Además, esta caja sellada protege los componentes metálicos de las condiciones climáticas externas y presión atmosférica, evitando la dilatación o contracción térmica, requiriendo de una calefacción adecuada para su funcionamiento. Por esta razón que los L&R deben funcionar con una temperatura operacional constante e invariable.

Según especificaciones del fabricante L&R, cada gravímetro tiene su propia temperatura (T°) precisa de operatividad; para los gravímetros que utiliza actualmente el Instituto, es de 51 °C para el modelo G-50 y de 49 °C para el modelo G-61, y son controladas e indicadas por un termómetro en cada instrumento. Cabe señalar que un descenso en la

temperatura genera un cambio físico en los componentes internos del gravímetro, el que no podrá generar lecturas fiables. Estas T° se estabilizan mediante un regulador termostático conectado a una fuente de energía con transformador de 220 V a 15 V cuando el instrumento se encuentra inactivo, y por sus baterías externas cargadas cuando se utiliza en el campo. El tiempo para alcanzar la temperatura operativa de cada gravímetro es entre dos y cinco horas, dependiendo de la temperatura interna a que se encuentre el instrumento.

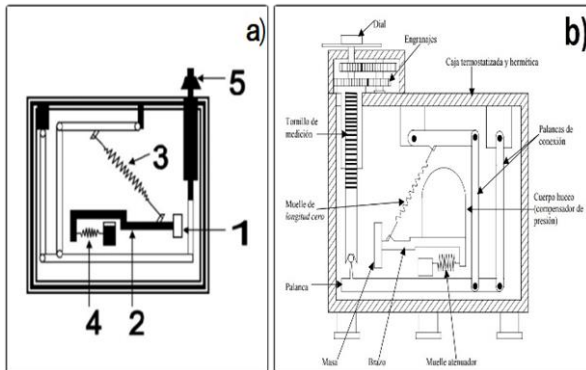


Imagen 3: Muestra el mecanismo interno de funcionamiento del gravímetro (a) y esquema interno del equipo (b). Fuente: Imagen a) CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005. Imagen b) MARTIN, Angel; PADIN, Jordi.2012

Se detalla la imagen a), donde el sistema sensor interno de gravedad consta de:

- 1.- Masa (10 g) suspendida inestable, la que se equilibra para determinar un valor de g.
- 2.- Barra horizontal, sufre desequilibrios ante las pequeñas variaciones de g, en su extremo está unida la masa.
- 3.- Resorte de longitud cero, el que sostiene a la barra horizontal.
- 4.- Resorte amortiguador, el que forma un pivote flotante, eliminando así cualquier fricción en el sistema de movimiento.
- 5.- Tornillo micrométrico, el que restaura en equilibrio el sistema de suspensión ante la variación de g y a la vez genera un valor de lectura. (CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005)

La operatividad del L&R es simple, sin embargo, para calibraciones y ajustes periódicos se recomienda un operador experimentado y metódico, el que debe tener un cuidado antes, durante y después de las mediciones en el campo, con el fin de obtener lecturas fiables, prestando

atención adicional a la posición de la línea de lectura, la que está definida intrínsecamente por el fabricante L&R para cada gravímetro. La constante de línea de fe para el gravímetro G-50 es de 2.5, y para el G-61 de 2.7.

El tornillo compensador o micrómetro llevará la constante a la posición de escala relacionada anteriormente, siempre de izquierda a derecha (si no se hace siempre de esta manera se generan errores). La línea de lectura se debe llevar despacio ya que es altamente sensible. Si se hace un movimiento fuerte esta se pasará del punto. De ser así, se debe regresar la línea con el tornillo compensador en contra sentido de las manecillas del reloj hasta sobrepasar la línea de lectura. Esto se debe hacer verificando que los niveles de burbuja estén nivelados. El gravímetro tiene un rango de medida de 7000 miligales y una precisión de lectura de más menos 0.05 miligales (mGal).

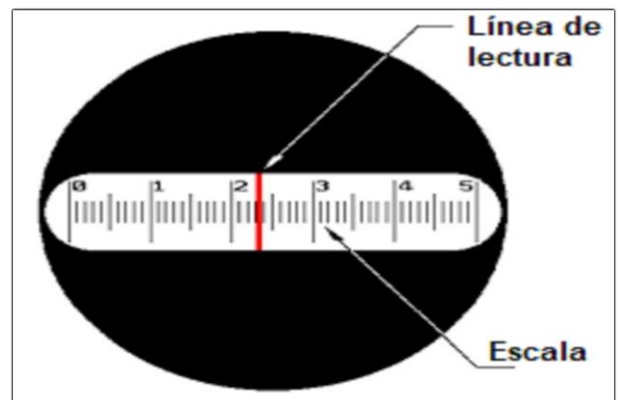


Imagen 4: Muestra aguja o línea de fe (2,3) en escala de lectura vista por el lente ocular del gravímetro L&R. Fuente: manual y uso de gravímetros L&R, Sección Geodésica, IGM.

FUNCIONAMIENTO DE LOS GRAVÍMETROS LACOSTE&ROMBERG (L&R) MODELO G

Los gravímetros L&R son equipos que pertenecen al tipo inestables o astáticos (estático mecánico), es decir, su mecanismo elástico opera cerca del estado de equilibrio inestable, haciéndolo más sensible a las variaciones de la potencia de g. (CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005).

Los L&R tienen la capacidad de medir observaciones relativas en el cambio de la aceleración de gravedad, con diferencias de hasta 7000 mGal, y su funcionamiento se basa en un conjunto de resortes y en un peso o masa situado en el extremo de un brazo, contrarrestado por un

resorte de longitud cero o principal. El movimiento de la masa es causado por las variaciones de la fuerza de gravedad, desplazando el brazo (barra) ligeramente, el resorte principal figura como elemento inestable, posibilitando la amplificación de pequeñas variaciones de la fuerza de gravedad.

En la práctica, el movimiento de la masa varía según la fuerza de gravedad de cada lugar y se anula mediante el tornillo micrométrico, equilibrando la masa mediante el resorte principal y la posición inicial del brazo, según la línea de fe de cada L&R, generando una lectura para la variación de la aceleración de la gravedad del sitio medido.

En síntesis, el funcionamiento de los L&R es un sistema preciso de suspensión, el que consiste en una masa suspendida inestablemente a través de una barra horizontal y sostenida por un resorte de compresión (resorte de longitud cero), generando un sistema no lineal.

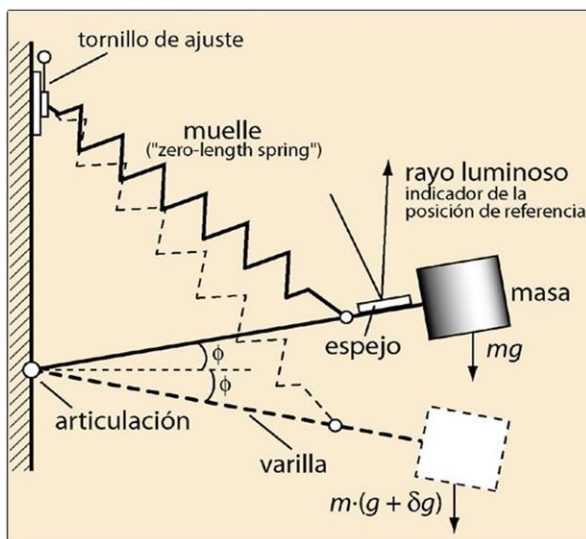


Imagen 5: Muestra una representación esquemática del funcionamiento interno del gravímetro L&R. Fuente: MARTÍNEZ, Pedro. 2014.

Las lecturas obtenidas por los gravímetros se deben a la condición de un equilibrio fijo que alcanza la masa, generado por el resorte de longitud cero, el que se deforma en respuesta al potencial de gravedad, ubicando la masa en una nueva posición de equilibrio cero, de cada lugar observado.

La barra horizontal, anteriormente señalada, se encuentra soportada por un resorte de amortiguamiento, formando un pivote flotante

conectado con tornillo de medición micrométrico (Dial).

El dial de alta precisión se gira hasta sobrellevar la línea de lectura, al valor de referencia de lectura representativo para cada gravímetro (G-50 es de 2.5 y para el G-61 es de 2.7). De esta forma se deja en equilibrio cero la masa, obteniendo una lectura numérica desde el contador y del dial micrométrico del gravímetro, la que es convertida en miligales mediante la tabla de conversión única para cada gravímetro.

Es importante señalar que el sistema de resorte del L&R pierde elasticidad con el tiempo, por lo tanto la constante de calibración de cada gravímetro deja de ser real. En virtud de lo anterior, los gravímetros deben ser calibrados a objeto de encontrar una relación entre el sistema de resorte y las variaciones del potencial de gravedad, mediante la medición de las desviaciones de los valores absolutos conocidos.

Considerando que la diferencia es lineal en el tiempo, se determina una corrección o factor de escala para toda la tabla de conversión en miligales utilizada en los cálculos de la aceleración de gravedad.

Basado en lo anterior, se hace indispensable calibrar los gravímetros, obteniendo diferencias de valores absolutos de g y los obtenidos por el gravímetro L&R periódicamente, o bien antes de iniciar un levantamiento gravimétrico en alguna zona extrema del país con el objeto de ajustar la tabla de conversión para la zona de trabajo.

VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN PARA DESIGNAR UN FACTOR DE ESCALA

Debido a la función no lineal del sistema mecánico elástico de suspensión del gravímetro, la constante de calibración varía con el tiempo, debido a la deriva instrumental.

En este contexto es importante verificar periódicamente el estado de desgraduación del sistema de funcionamiento de cada equipo, con el objeto de cambiar su constante de calibración, designando un factor de escala, que rectifique el desajuste que pueda sufrir el mecanismo para la conversión en miligales, en el proceso y cálculo de la aceleración de gravedad.

Para obtener el factor de escala de cada gravímetro se realiza mediante las diferencias entre la aceleración de gravedad de estaciones absolutas y

la obtenida por cada gravímetro. Para tal comparación se utilizan estaciones absolutas con una vasta diferencia en su valor g entre ellas, a objeto de obtener esta misma diferencia entre las lecturas obtenidas por los gravímetros y así visualizar un mejor análisis de comparación.

La forma práctica de verificar la constante de calibración de cada gravímetro es ejecutando circuitos de medición entre 2 o 3 estaciones absolutas y, en términos comparativos, obtener un factor de escala para la zona de medición.

Según el asesor científico de SIRGAS, Dr. Denizar Blitzkow, se puede ejecutar dos procedimientos para obtener el factor de escala. El primero es generar un circuito longitudinal entre estaciones absolutas distantes a 500 km, y el segundo es realizar circuitos de medición, generando un perfil transversal con una considerable diferencia de altura nivel medio del mar (mar y cordillera), ambos métodos tienen el propósito de obtener diferencias de lectura en mGls importantes y el período máximo de medición de cada circuito no debe exceder las 48 horas.

OBTENCIÓN DEL FACTOR DE ESCALA L&R MODELOS G50 Y G61

Debido a los últimos proyectos gravimétricos realizados por el IGM, que tienen como objetivos materializar una estación IHRF y la actualización de las líneas de nivelación, donde se generaron datos de gravedad, fue necesario verificar el estado de calibración de los instrumentos y determinar los factores de escala para cada L&R que posee este Instituto. El proceso de calibración permite comparar lecturas instrumentales con valores exactos de g provenientes de dos o más estaciones absolutas gravimétricas.

Para determinar el factor de escala (k), se compara la diferencia de la aceleración de g entre los puntos absolutos utilizados para la calibración y la gravedad obtenida por cada gravímetro. Por lo tanto, la diferencia observada en la aceleración Δg_{obs} será distinta de la diferencia conocida en las estaciones absolutas Δg_{abs} , de modo que (CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005):

$$\Delta g_{abs} = k \cdot \Delta g_{obs}$$

CIRCUITOS DE CALIBRACIÓN

Como una manera de efectuar el control al instrumental de gravedad (factor de escala) de los

dos gravímetros que posee el IGM, a modo de tener la certeza de su buen funcionamiento, se han creado dos circuitos de calibración, utilizando el método de diferencia de altura n.m.m., donde se generó un perfil transversal de 150 km y un desnivel de 3000 m entre las estaciones ubicadas en Valparaíso, Santiago y Valle Nevado.

El primer circuito se encuentra entre estaciones absolutas de Santiago (IGM1) y Valparaíso (SHOA), y el segundo entre las estaciones de Santiago (IGM1) y Valle Nevado (VNEV).



Imagen 6: Gráfico de ubicación referencial de las estaciones absolutas utilizadas en los circuitos. Fuente: Imagen IGM, 2022.

Es importante señalar que antes de las mediciones de los circuitos se realizó la estabilización y calibración de la sensibilidad de los gravímetros, a modo de asegurar la correcta lectura y así obtener valores de gravedad precisos en cada circuito planificado. En relación a las observaciones gravimétricas, estas se obtuvieron aplicando el método de "ida y vuelta", consistente en medir una lectura de apertura en IGM1, luego en SHOA y regresar a IGM1 para el cierre del circuito, empleando la misma forma para el circuito IGM1-VNEV.

Con respecto a la medición de cada estación absoluta, se registraron tres lecturas por cada uno de los instrumentos (G-50 y G-61), y las discrepancias entre las lecturas registradas (diferencia entre la mayor y la menor de las tres) fueron inferiores a 0,01 mGal, además en las estaciones absolutas SHOA y PORT se realizó doble sesión de medición esperando 30 minutos entre cada una de ellas.

Los operadores de cada gravímetro, luego de obtener las lecturas en su correspondiente instrumento, realizaban una lectura en el instrumento del otro operador, la cual debía coincidir, a modo de aseverar la correcta

observación de cada operador, librando a las lecturas de cualquier vicio o error y manteniendo la tolerancia de 0,01 mGal.

Una vez terminados los circuitos de medición, se realizó el procesamiento y cálculo de estos, con el fin de obtener nuevos valores de aceleración de gravedad de cada estación absoluta y así encontrar discrepancias con el valor de g absoluto de cada estación. Estas diferencias son utilizadas en el cálculo a modo de obtener los factores de escala de cada gravímetro.

PROCESAMIENTO DE LOS DATOS Y DETERMINACIÓN DE LA ACELERACIÓN DE GRAVEDAD (G)

Una vez terminados los circuitos de medición, se realizó el procesamiento y cálculo de las lecturas obtenidas en el campo con el programa "CADGRAV", de carácter científico, desarrollado por la Universidad de Sao Paulo en conjunto con el Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística de Brasil.

Con el propósito de obtener el factor de escala, se calculó la aceleración de g de cada estación absoluta medida, a modo de comparar con la gravedad absoluta.

Para el cálculo de la aceleración de gravedad, CADGRAV realiza la conversión de lectura instrumental en unidades miligales, con correcciones por los efectos de deriva instrumental y atracción luni-solar, generando un "output" con valores de aceleración de gravedad, anomalías de Bouger y anomalías de aire libre.

Lo anterior es debido a que el procedimiento de medición consiste en ubicar los L&R en una estación de partida, absoluta o relativa, y realizar lecturas durante el día en distintos puntos; al cerrar los circuitos de medición, los valores de lectura cambian para una misma estación debido a dos causas:

1.- Efectos de mareas terrestres, debido a la atracción gravitacional que ejercen el Sol y la Luna, generando en la Tierra el fenómeno de alta y baja marea, provocando una variable de 0.25 mGal.

2.- La deriva instrumental, que es originada por cambios físicos y desgastes de los componentes internos de los L&R, generando una modificación progresiva en las lecturas obtenidas por los gravímetros para cada punto.

Cabe mencionar que el *software* realiza estas correcciones a objeto de enlazar las lecturas a una hora similar de observación, con el fin de obtener valores de aceleración de gravedad como si todas las observaciones hubiesen sido hechas de forma simultánea.

CONVERSIÓN DE LECTURA INSTRUMENTAL EN MILIGALES

Este es un procedimiento bastante simple y se puede resolver con la tabla de conversión a miligales, única para cada gravímetro, elaborada por L&R. Dicha tabla (Tabla 1) contiene los diversos factores de conversión dentro de los rangos de lectura y es ingresada como archivo en el proceso de cálculo del programa CADGRAV. Para convertir una lectura instrumental a miligales se realiza el siguiente procedimiento, utilizando como ejemplo la tabla de conversión del gravímetro L&R G50:

1. Lectura realizada en el instrumento: 2664,30
2. Lectura inferior constante en tabla: 2600,00
3. Valor mGal de lectura inferior en tabla: 2728,13
4. Factor de lectura inferior en tabla: 1,04946
5. Diferencia entre ítems 1 y 2: 64,3
6. Producto entre ítems 5 y 4: $64,3 \times 1,0496 = 67,48$
7. Para obtener lectura instrumental en mGal, sume los ítems 6 y 1: $67,48 + 2664,30 = 2731,78$ mGal.

Lectura Contador	Valor en Miligales	Factor para intervalo	Lectura Contador	Valor en Miligales	Factor para intervalo
0	0,00	1,04987	3600	3777,86	1,05022
100	104,99	1,04978	3700	3882,88	1,05041
200	209,97	1,04970	3800	3987,93	1,05057
300	314,94	1,04961	3900	4092,98	1,05071
400	419,9	1,04954	4000	4198,05	1,05082
500	524,85	1,04946	4100	4303,14	1,05092
600	629,8	1,04939	4200	4408,23	1,05102
700	734,74	1,04933	4300	4513,33	1,05113
800	839,67	1,04926	4400	4618,44	1,05122
900	944,59	1,04920	4500	4723,56	1,05131
1000	1049,51	1,04914	4600	4828,7	1,05138
1100	1154,43	1,04909	4700	4933,83	1,05144
1200	1259,34	1,04908	4800	5038,98	1,05150
1300	1364,25	1,04907	4900	5144,13	1,05153
1400	1469,15	1,04906	5000	5249,28	1,05156
1500	1574,06	1,04906	5100	5354,44	1,05157
1600	1678,96	1,04907	5200	5459,59	1,05156
1700	1783,87	1,04908	5300	5564,75	1,05155
1800	1888,78	1,04910	5400	5669,9	1,05155
1900	1993,69	1,04911	5500	5775,06	1,05153
2000	2098,6	1,04911	5600	5880,21	1,05149
2100	2203,51	1,04913	5700	5985,36	1,05145
2200	2308,42	1,04916	5800	6090,51	1,05140
2300	2413,34	1,04921	5900	6195,65	1,05135
2400	2518,26	1,04928	6000	6300,78	1,05126
2500	2623,19	1,04937	6100	6405,91	1,05116
2600	2728,13	1,04946	6200	6511,02	1,05099
2700	2833,07	1,04954	6300	6616,12	1,05077
2800	2938,03	1,04961	6400	6721,2	1,05055
2900	3042,99	1,04965	6500	6826,25	1,05034
3000	3147,95	1,04969	6600	6931,29	1,05017
3100	3252,92	1,04973	6700	7036,31	1,04999
3200	3357,89	1,04979	6800	7141,3	1,04983
3300	3462,87	1,04986	6900	7246,29	1,04968
3400	3567,86	1,04995	7000	7351,26	
3500	3672,85	1,05008			

Tabla 1: Muestra relación de lectura instrumental y valores en miligales para gravímetro L&R G50. Fuente: Gravímetro L&R G50.

CORRECCIÓN DE MAREAS TERRESTRES (LUNI-SOLAR)

Las variaciones de las mareas terrestres son producidas por la fuerza gravitatoria del Sol y la Luna ejercida sobre la Tierra, generando la redistribución de grandes masas de agua en el planeta, variando el potencial de gravedad en distintas zonas geográficas, lo que es percibido por la masa inestable de los gravímetros L&R.

Además de las fuerzas gravitatorias, las variaciones de mareas también dependen de factores ambientales, situación geográfica y época del año.

La corrección de marea se aplica al valor de g y es dada por la componente vertical de la atracción del Sol y la Luna, utilizando la siguiente fórmula:

$$C_g = g P_L^3 M_L^T (3 \cos^2 Z_L - 1) + g P_S^3 M_S^T (3 \cos^2 Z_S - 1) \delta$$

Donde:

- (L) se refiere a la Luna.
- (S) representa al Sol.
- (g) es un valor medio por gravedad.
- (P) es la paralaje horizontal obtenida de las efemérides del Sol y desde la Luna.
- (M) es la masa de la estrella perturbadora en relación con la Tierra (T).
- (Z) es la distancia cenit geocéntrico de la Luna y el Sol.
- (δ) un factor gravimétrico regionalizado.

(CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005)

DERIVA INSTRUMENTAL

La deriva instrumental altera sistemáticamente y de forma gradual las lecturas obtenidas por los L&R, y no está relacionada a los cambios de la fuerza de gravedad, sino a la dilatación o contracción de los componentes internos del gravímetro, principalmente de los resortes que posee. Estos son afectados por la variación de la temperatura, presión atmosférica y mareas terrestres, así como también cuando el instrumento permanece inmóvil por un tiempo prolongado o sufre movimientos bruscos durante su traslado. Procede de lo anterior generar un factor de escala para cada gravímetro.

Además, cabe señalar que existe una deriva estática, la cual se produce durante las mediciones diarias en el campo, y es cuando el gravímetro permanece inmóvil por más de dos horas seguidas. Generalmente esta inmovilidad se produce cuando

se pernocta en medio de un circuito. (CORREA, Carlos; CASTRO, Junior.2005). Frente a esto, se debe realizar dos mediciones específicas en el mismo lugar para determinar la deriva estática. La primera es al término del día de medición, siendo el último registro de lectura, antes que el gravímetro este en reposo; y la segunda es al inicio de las mediciones del día siguiente, siendo la primera lectura del día. La diferencia de estas dos lecturas son corregidas por los efectos de la marea y su valor debe agregarse algebraicamente en todas las lecturas realizadas del día siguiente.

Corrección por deriva estática:

$$\text{Deriva Instrumental} = \frac{Li(\text{base}) - Lf(\text{base})}{t}$$

Donde:

- Li = lectura inicial de la base.
- Lf = lectura final de la base.
- t = representa el tiempo entre Li y Lf .
- La lectura corregida está dada por:

$$LE_{\text{corr}} = LE_{\text{Scorr}} + Di \times t$$

Donde:

- LE_{corr} = Lectura Estación Corregida.
- LE_{Scorr} = Lectura Estación Sin Corregir.
- Di = Deriva Instrumental.
- t = tiempo entre lectura de estación base y lectura de cada una de las otras estaciones.

Esta corrección permite que ambas lecturas, realizadas en el mismo lugar pero en diferentes horarios, sean invariables.

CÁLCULO DE LA GRAVEDAD OBSERVADA (G)

El valor de la gravedad observada de cada estación se calcula por la siguiente fórmula:

$$g_{\text{obs}} = ((lp - lb)k \pm CLS \pm D + gb)$$

Donde:

- g_{obs} = la gravedad observada en punto p.
- lp = lectura del gravímetro en punto p.
- k = constante de calibración del gravímetro.
- CLS = corrección lunisolar.
- D = corrección por deriva del gravímetro.
- lb = lectura del gravímetro en la base.
- gb = valor de gravedad absoluta en la base. (RIVAS, Tania.2016)

RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS GRAVIMÉTRICOS Y PROCEDIMIENTO DE

CÁLCULO PARA OBTENER EL FACTOR DE ESCALA

A continuación, se detallan en tablas los resultados de las lecturas gravimétricas de los circuitos medidos a objeto de obtener los factores de escala. Cabe señalar que todos los resultados se encuentran en mGal.

Paso 1: compilar los valores de G conocidos de cada estación absoluta, para ingresar al programa CADGRAV como estación de referencia.

Estaciones Absolutas	g Conocido
Santiago (IGM 1)	979414,48
Valparaíso (SHOA)	979607,08
Valle Nevado (VNEV)	978784,6

Tabla 2: Aceleración de gravedad conocida de cada estación absoluta. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

Paso2: en relación a las lecturas obtenidas por los gravímetros G50 y G61, utilizados en los circuitos IGM1-SHOA / IGM1-VNEV, el cálculo de los valores de g se realizó con el factor de escala 1,00000000.

Absolutas	g obtenido G-50	g obtenido G-61
1 Santiago (IGM 1)	980000,06	980000,06
2 Valparaíso (SHOA)	980193,42	980193,52
3 Santiago (IGM 1)	980000,09	980000,07
4 Valle Nevado (VNEV)	979370,51	979370,37

Tabla 3: Muestra los valores de g obtenidos de cada estación en cada circuito por gravímetro. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

Paso3: posteriormente se realizó la diferencia entre g conocido y g obtenido.

Circuito	Diferencia g conocido	Diferencia g-G50	Diferencia g-G61
IGM - SHO A	193,48	193,36	193,46
IGM - VNEV	629,88	629,58	629,7

Tabla 4: Muestra diferencia de los valores de g conocidos y diferencia de g de cada gravímetro. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

Paso4: Se obtiene el factor de escala de cada circuito, donde la diferencia de g absoluto se divide con la diferencia del valor g obtenido.

Factor de Escala	G-50	G-61
Circuito IGM - SHO A	1,0006206	1,00010338
Circuito IGM - VNEV	1,0047651	1,00028585

Tabla 5: Muestra factor de escala para cada circuito. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

Paso5: para obtener el factor del escala final de cada gravímetro se promedió entre los circuitos medidos.

Gravímetro	G-50	G-61
Factor de escala definitivo	1,00054856	1,00019462

Tabla 6: Muestra factor de escala definitivo para los gravímetros G-50 y G-61. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

Una vez obtenidos los factores de escala correspondientes para cada gravímetro, se procedió a ingresarlos en la “Tabla de conversión de lecturas a miligales”, única para cada gravímetro y utilizada por el software CADGRAV.

Altura (m)	g (mGal)
000	000.00
100	104.99
200	209.97
300	314.94
400	419.90
500	524.85
600	629.80
700	734.74
800	839.67
900	944.59
1000	1049.51
1100	1154.43
1200	1259.34
1300	1364.25
1400	1469.15
1500	1574.06
1600	1678.96

Altura (m)	g (mGal)
000	000.00
100	103.71
200	207.42
300	311.14
400	414.86
500	518.59
600	622.33
700	726.07
800	829.82
900	933.57
1000	1037.31
1100	1141.05
1200	1244.79
1300	1348.54
1400	1452.30
1500	1556.06
1600	1659.83

Tabla 7: Muestra los valores en miligales para gravímetros G61 y G50 en archivo “input”. Fuente: Sección Geodésica, IGM.

CONCLUSIONES

A principio del año 2000 y por primera vez en Chile, se determinan cuatro estaciones de gravedad absoluta, en cooperación con el National Imagery Mapping Agency (NIMA), quedando ubicadas en las ciudades de Iquique, Santiago, Puerto Montt y Punta Arenas, sirviendo de base para la determinación de la Red Nacional de Gravedad.

Posteriormente, en el período 2000-2007, en colaboración con el Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística (IBGE) y la Universidad de Sao Paulo, se realizan campañas gravimétricas durante las que se determinan setenta estaciones de gravedad relativas, cubriendo la totalidad del territorio nacional, y se obtienen más de dos mil quinientos puntos de densificación a objeto de generar un modelo geoidal para Sudamérica en el marco del Grupo III de SIRGAS, donde el IGM aportó datos combinados (GNSS, cotas n.m.m. y gravedad) para dicho proyecto.

Actualmente, el Instituto Geográfico Militar, como agencia responsable de la geodesia en Chile, se encuentra a la vanguardia de los requerimientos de organismos internacionales, los que recomiendan generar nuevos sistemas de referencia verticales globales, adoptando alturas físicas. En este contexto, la sección geodésica del Instituto materializó, en noviembre de 2021, la primera estación en Chile para el Sistema Internacional de Alturas (IHRS/IHRF), ejecutada de acuerdo a las guías instructivas confeccionadas por el Grupo de Trabajo III de SIRGAS, que señalan que cada estación debe ser materializada por una Estación de Referencia de Operación Continua (CORS), de manera que sea posible monitorear y detectar deformaciones en el marco de referencia de cada país y, a la vez, esté integrada a la red SIRGAS-CON, permitiendo una sostenibilidad y estabilidad a largo plazo, siendo el origen para densificaciones nacionales o regionales.

En relación a todo lo anterior, se hace imprescindible el correcto uso y funcionamiento de los gravímetros, como también efectuar un control periódico al instrumental a objeto de tener la certeza de su buen funcionamiento, para lo cual fue necesario realizar un ajuste de calibración en las lecturas instrumentales, asignando un factor de escala para cada gravímetro con el fin de obtener, en el cálculo, mejores grados de precisión en la determinación diferencial de g.

Este trabajo significó un gran desafío a los integrantes de la Sección Geodésica de este Instituto, ya que les exigió potenciar sus capacidades en esta materia, orientando los esfuerzos hacia el desarrollo de nuevos productos en el ámbito de la gravimetría, una innovación que es un aporte de esta sección al funcionamiento del IGM, lo que resultó una experiencia muy gratificante para todos.

BIBLIOGRAFÍA

BLITZKOW, D., PALLEJA, E., PACINO, C., LAURIA, E., RAMOS, R. *Calibración y asignación de escala para gravímetros Lacoste&Romberg*. Bs. Aires Argentina, septiembre 2004.

BLITZKOW, D. *et al.* "Primeros esfuerzos para el establecimiento del IHRF en Brasil". Simposio Sirgas 2017.

CORREA, C., CASTRO, J. *Contribución al establecimiento de un sistema gravimétrico para América del sur*. Sao Paulo, Brasil. 2005.

RIVAS, T. *Estudio de perfil gravimétrico a lo largo del eje Santa Juana-Carampangue, Cordillera de Nahuelbuta, Región del Biobío, Chile*. Habilitación profesional UdeC 2016.

SÁNCHEZ, L. "Sistema Internacional de Alturas IHRS (International Height Reference System)". Webinar SIRGAS, 2020-06-25.

MARTIN, A., PADIN, J.. "Geodesia física: material de prácticas". Universidad Politécnica de València. 2012.

MARTÍNEZ, P. *Prospección Geofísica. Método de campo natural*. Universidad De Cartagena. 2014.