

INDICE

1 Gravimetría absoluta.....	1
1.1 El sistema del Gravímetro Absoluto LJILAG-3	1
1.2 Mediciones de Gravimetría Absoluta en Uruguay	1
1.3 Procesamiento de los Datos	2
1.1.1 Ecuación de Observación	2
1.1.2 Reducciones	2
1.1.3 Resultados de la estación de gravedad.....	4
2 Gravimetría Relativa	5
2.1 El sistema del gravímetro relativo LaCoste & Romberg	6
2.2 Mediciones de Gravedad Relativa en Uruguay	7
2.2.1 Determinaciones gravimétricas previas.....	7
2.2.2 Determinación del Datum gravimétrico	7
2.2.3 Establecimiento de la Red Gravimétrica Fundamental	8
2.2.4 Densificación de la Red	8
2.2.5 Nuevos enlaces internacionales de gravimetría relativa	9
3 El ajuste de la Red Gravimétrica Uruguaya	10
3.1 Precalibración y reducciones	10
3.2 Ecuación de Observación	11
3.3 Ajuste de la red	11
4 Resultados	13
4.1 Mediciones de Gravedad Absoluta	13
4.2 Red Gravimétrica Nacional	14
5 La Línea de Calibración Gravimétrica en Uruguay	16
6 Referencias	19
Anexo	20

El Ajuste de la Red Gravimétrica Nacional de Uruguay

W. Subiza

Servicio Geográfico Militar (SGM)

8 de Octubre 3255, Montevideo 11600, Uruguay

L. Timen, W. Torge

Institut für Erdmessung (IFE), University of Hannover

Nienburger Str. 6, D-30167, Hannover, Germany

1. Gravimetría Absoluta

1.1 El sistema del Gravímetro Absoluto JILAG-3

El sistema del Gravímetro Absoluto JILAG-3 del IFE, fue empleado en el programa de Gravimetría Absoluta de Sud América, en combinación con gravímetros relativos del tipo LaCoste & Romberg. El gravímetro JILAG-3, es un aparato transportable del tipo de caída libre, desarrollado por el Prof. J.E. Faller y colaboradores en el Instituto Conjunto para el Laboratorio de Astrofísica (JILA) de la Universidad de Boulder, Colorado, EE.UU. (Faller y otros, 1983). Es operado por el IFE desde 1986 y ha sido usado en más de 130 determinaciones de gravedad en todo el mundo. Tanto el instrumento como sus mediciones y los métodos de evaluación empleados en el IFE, están bien documentados (Torge y otros, 1987), por lo que aquí resumiremos solamente las principales características.

El instrumento (Fig.1), incluye un interferómetro Michelson con un laser de frecuencia estabilizada para el posicionamiento del objeto que cae (una sección de esquina de cubo reflectora del interferómetro) y un oscilador de frecuencia atómica para la medición de tiempo. Se opera bajo gran vacío (10^{-4} Pa) y el ruido de microsismos en el reflector es absorbido en su mayor parte por un resorte (superspring) con un Eigen periodo, electrónicamente generado, de 30 a 40 segundos. Docientas mediciones de tiempo/distancia se realizan en el trayecto de caída de 0.25m y son ajustados en línea para determinar la parábola que nos dé el valor de G para la altura de referencia (unos 0,8 m). Generalmente se efectúan 1500 caídas por estación distribuidas en 1 o 2 días, incrementándose el número de caídas cuando el nivel de ruido es alto. Del análisis de los resultados de 6 años del JILAG-3, se ha encontrado un promedio de precisión (desviación estándar del valor medio de la estación) del orden de $0.01 \mu\text{ms}^{-2}$ (Torge 1991) en estaciones "estables". La precisión para períodos más largos incluye errores en la calibración del láser, residuales de microsismos, efectos de sacudimientos del piso y ruido gravitacional debido a efectos no suficientemente modelados de mareas terrestres, cambios de presión de la atmósfera, variaciones de aguas y mezclas de suelos (en terrenos sedimentarios) estimamos $G \pm 0,02$ a $\pm 0,03 \mu\text{ms}^{-2}$.

1.2 Mediciones de Gravimetría Absoluta en Uruguay

Por medio del programa IFE Sudamericano de Gravedad Absoluta 1988-1991 (Torge y otros, 1994) se estableció un sistema de control de gravedad absoluta, consistente en 22 estaciones, cubriendo gran parte de Sud América. En Uruguay, la selección regional y local de las estaciones fue manejada por el SGM, siguiendo los criterios dados por el IFE y teniendo en cuenta aspectos locales de microsismos y logística. El sistema del gravímetro absoluto IFE JILAG-3, fue empleado conjuntamente con los gravímetros LCR G298 y G709 (IFE) y G13 y G7032 (SGM).

Ajuste de la Red Gravimétrica Uruguaya

De 1500 a 3000 caídas se han realizado por estación de acuerdo a los microsismos locales. Las estaciones Rivera y Toledo fueron establecidas en marzo de 1989. En diciembre de 1991, se agregó la estación Paysandú y Toledo fue reocupada. La desviación estándar para una caída varió entre $\pm 0,5$ y $\pm 1,5 \mu\text{m}^{-2}$, la desviación estándar

de los valores ajustados de gravedad están entre $\pm 0,01$ y $\pm 0,06 \mu\text{ms}^{-2}$. Para mejorar la definición del Datum de gravedad absoluta en Uruguay, la estación Toledo fue conectada al punto absoluto en Buenos Aires, Argentina (ocupada por JILAG-3 en 1989, desviación estándar de $\pm 0,04 \mu\text{ms}^{-2}$ y en 1991, desviación estándar de $\pm 0,05 \mu\text{ms}^{-2}$).- El trabajo de campo con JILAG-3 y los gravímetros LCR fue realizado por Dip. Ing.D.Beening (IFE, 1989), Cap. J. Melconian (SGM, 1989) Dr.-Ing. R.H. Roder (IFE, 1989/91), Dipl.-Ing. S.Sander (IFE, 1991) y May. W. Subiza (SGM, 1991).-

1.3 Procesamiento de los Datos

1.3.1 Ecuación de Observación

En una caída libre con el JILAG-3, se realizan 200 mediciones de tiempo y distancia. La ecuación del movimiento para un único par de datos de tiempo/distancia, está dada por:

$$z_i = z_0 + v_0 t_i + \frac{1}{2} (g_0 + z_0 \gamma) t_i^2 + \frac{1}{6} v_0 \gamma t_i^3 + \frac{1}{24} g_0 \gamma t_i^4, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 200. \quad (1.1)$$

z_i es

la medición de posición en el instante t_i . Las constantes de integración z_0 y v_0 , son la posición y velocidad del objeto que cae en $t = 0$.- Introduciendo el gradiente vertical γ , el valor de gravedad g_0 se refiere a la posición inicial z_0 de la masa que cae (punto de liberación). Para el gradiente vertical γ , se usa el valor $\Delta g / \Delta H_{(1\text{ m})}$ medido por gravimetría relativa entre la marca terrestre y el punto de referencia a 1 m. de altura. Del ajuste por Mínimos Cuadrados de experimentos de caída libre, se obtienen las incógnitas, g_0 , z_0 y v_0 .-

1.3.2. Reducciones

Al considerar el tiempo finito de viaje de la luz ($c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$), en el procedimiento de medición interferométrico, la observación de tiempo t_i es corregida agregando el término z_i/c , antes del procesamiento de datos. El valor resultante t_i es introducido en (1.1). El valor de esta corrección es del orden de $0.13 \mu\text{ms}^{-2}$.-

Para la reducción gravimétrica de mareas terrestres, se usa el desarrollo de una serie de amplitud de 1.164 y una variación de fase cero (hasta 1989) para las mareas parciales de largo y corto período. Para el término de tiempo constante MOSO, se usó un factor de amplitud 1.000 y una fase de 0.000° , de acuerdo a los estándares de la AIG (Rapp, 1983). Desde 1990, el IFE usa el modelo de desarrollo de series CTE (Cartwright-Taylor-Edden) de 505 ondas (Cartwright y Taylor, 1971, Cartwright y Edén, 1973) y la base de datos del Centro Internacional de Mareas Terrestres (Melchior y otros, 1984), para aplicar un modelo refinado de mareas con parámetros observados. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de mareas terrestres usados en la evaluación de resultados de 1991.

Ajuste de la Red Gravimétrica Uruguaya

Grupo Ondas	N° de Onda		Factor Amplitud	Fase
	De	A		
MOSO	1	1	1.000	0.00
Mf	2	128	1.164	0.00
O1	129	241	1.182	-0.29
K1	242	333	1.149	-0.04
N2	334	398	1.163	0.26
M2	399	441	1.172	0.59
S2	442	488	1.144	0.08
M3	489	505	1.100	0.00

Tabla 1: Parámetros de Mareas Terrestres para Paysandú y Toledo (usados para el procesamiento de los datos de 1991)

de acuerdo a la Resolución N° 9, 1983 de la AIG, las variaciones de gravedad debido a los cambios de presión atmosférica (efecto directo de la atracción de la masa de aire e indirecto a través de la deformación de la tierra sólida) se reducen por

$$\Delta g_{\text{aire}} = 0,30 \cdot 10^{-2} (\text{Pa} \cdot \text{Pn})_{[\text{hPa}]} \quad [\mu\text{ms}^{-2}]. \quad (1.2)$$

P_a es la presión atmosférica real, la cual es medida por un sensor electrónico durante las mediciones de gravedad con JILAG-3. P_n es la presión atmosférica normal, definida por DIN540:

$$(1.3) \quad P_n = 1013,25 \left(\frac{1 - 0,006 H_{[\text{m}]}}{288,15} \right)^{5,2559} \quad [\text{hPa}].$$

H es la altitud de la estación sobre el nivel del mar.

El cambio de posición de la tierra debido al giro de su eje (movimiento polar) causa un cambio de gravedad. Referido al Origen Convencional Internacional (OCI), la reducción de gravedad aplicada es:

$$\Delta G_{\text{pol}} = -\delta \omega^2 \alpha \text{sen}(2\varphi) (\text{x} \cos\lambda - \gamma \text{sen}\lambda) \quad (1.4)$$

con un factor de amplitud $\delta = 1.16$, la velocidad angular terrestre (elipsoide de referencia SGR 80) $\omega = 7,292225 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$, el semieje mayor (SRG80) $\alpha = 6378137 \text{ m}$, el sistema de coordenadas geográficas (SGR80) φ, λ y las coordenadas polares x, y [rad] en el Sistema SIRT (Servicio Internacional de Rotación Terrestre). El SIRT provee coordenadas polares diariamente, Las reducciones aplicadas para Uruguay, varían entre 0.01 y 0.10 μms^{-2} .

Los valores de gravedad absoluta medidos deben ser transferidos desde la altura de referencia del JILAG-3 (~ 0.8 a ~ 0.9) a la marca en el terreno. La reducción al nivel terrestre es calculada por:

$$\Delta g_{\text{Terr}} = - \frac{\Delta g}{\Delta H_{1m}} \cdot H_{\text{ref}}, \quad (1.5)$$

donde $\Delta g/\Delta H_{(1m)}$, está definida por las mediciones de gravedad relativas, ver 1.3.1. todos los términos de reducción deben ser agregados al valor de g medido.-

1.3.3. Resultados de la estación de gravedad

El ajuste de las mediciones del JILAG-3, acorde a (1.1), dan como resultado un valor de g para cada caída libre realizada (caída). El procedimiento de medición se organiza de tal forma que 30 caídas automáticas (una corrida), toma alrededor de 70 minutos. Una corrida es dividida en 10 conjuntos (30 caídas, $\Delta t = 12\text{s}$) con una interrupción de 1 minuto entre cada conjunto de mediciones. Cuando una corrida finaliza, el instrumento realineado se comprime y el ajuste de la electrónica se comprueba. Se realizan normalmente 5 corridas para la obtención de un valor confiable de gravedad para la estación. Cuando la estación presenta fuerte influencia de microsismos, el número de corridas puede incrementarse hasta por un factor de 2.

Durante una corrida, las mareas terrestres cambian hasta valores de $0.5 \mu\text{ms}^{-2}$. De esta manera se aplica una reducción de mareas terrestres para cada caída. El resultado de la estación es calculado en la siguiente forma:

- a) después de cada conjunto (30 caídas)
cálculo del resultado (media aritmética de los resultados reducidos de marea terrestre)

$$g_{\text{conj}} = \frac{\sum_{i=1}^{nc} g_i}{nc}, \text{ nc: caídas por conjunto}, \quad (1.6)$$

con una desviación estandar de una caída individual y de la media del conjunto de

$$D_{\text{caída}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nc} (g_{\text{conj}} - g_i)^2}{nc - 1}}, \quad D_{\text{conj}} = \frac{\delta_{\text{caída}}}{\sqrt{nc}} \quad (1.7)$$

- b) después de cada corrida:
cálculo del resultado de la corrida

$$g_{\text{corr}} = \frac{\sum_{j=1}^{n \text{ conj}} g_{\text{conj},j}}{n \text{ conj}}, \text{ n conj: conjuntos por corrida,} \quad (1.8)$$

con su desviación estandar de

$$D_{\text{corr}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n \text{ conj}} (g_{\text{corr}} - g_{\text{conj},j})^2}{n \text{ conj} (n \text{ conj} - 1)}}; \quad (1.9)$$

la presión atmosférica y los valores de reducción del movimiento polar, se deben agregar a los resultados;

c) luego de finalizadas todas las mediciones en la estación:
cálculo del resultado de estación (media aritmética del resultado de las corridas, reducidos de la presión atmosférica y el movimiento polar)

$$g_{\text{estac}} = \frac{\sum_{l=1}^{n \text{ corr}} g(\text{corr}, l)}{n \text{ corr}}, \text{ n corr: corridas por estación} \quad (1.10)$$

y su desviación estándar

$$D_{\text{media}} = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{n \text{ corrid}} (g_{\text{estac}} - g_{\text{corrid},l})^2}{n \text{ corrid} (n \text{ corrid} - 1)}}; \quad (1.11)$$

Luego de aplicar la reducción de altura (1.5) a g_{estac} , el valor de gravedad obtenido a nivel del suelo $g_{\text{estac}, h=0,000m}$ es la referencia para posteriores mediciones de gravedad relativa (conexiones a redes nacionales, etc).

2. Gravimetría Relativa

2.1. El sistema del gravímetro relativo LaCoste & Romberg

El gravímetro relativo LaCoste & Romberg está basado en el concepto de la suspensión de una masa por medio del “resorte de longitud cero”, desarrollado por Lucien LaCoste en 1932.

Después de algunas mejoras, en 1959 se construye el modelo G (por Geodésico). Con un alcance mundial de 7.000 mgals. y un peso de 3,6 kgrs., está montado en una caja de fiberglass y con una aislamiento rígido de espuma. El gravímetro está sellado con gas seco inerte y calentado termostáticamente a una temperatura de unos 50° C, de manera de prevenir los efectos de los cambios de presión barométrica y la expansión-contracción de los metales.-

La figura simplificada N° 2 (LCR,1992), nos muestra una pequeña masa suspendida en un extremo de un eje horizontal. Un resorte de “longitud cero”, situado a 45° de inclinación inmediatamente detrás de la masa, mantiene a ésta en la posición cero (horizontal).

La sensibilidad de este sistema no lineal, se aumenta igualando las fuerzas de torsión del resorte y la atracción de gravedad. Este procedimiento se conoce como astatización y permite detectar pequeños cambios en la aceleración vertical (o gravedad), a través de los grandes movimientos que se producen en el resorte.-

Un conjunto de resortes y alambres actúa como una palanca carente de fricción al otro lado del eje, permitiendo que se reduzcan los efectos de los impactos en el gravímetro. Las partes móviles tienen reducido su recorrido a sólo una décima de milímetro, proporcionando una medida de seguridad extra en caso de daños de equipo,. El eje debe además, ser trabado cuando no está en uso, operación en la cual es movido hacia atrás, de esta manera mantiene su longitud en cualquier posición. Para mantener el sistema completo en posición horizontal, el operador cuenta con un par de niveles de burbuja, situados cada uno entre ellos a 90° y con una sensibilidad de 40µgal por 1 minuto de arco.

En el momento que varía la fuerza de gravedad que afecta la pequeña masa, es posible restaurar la posición original del eje por medio de un tornillo de alta precisión, que actúa sobre un par de palancas, las cuales a su vez actúan sobre el resorte de longitud cero. Para lograr esto, el gravímetro cuenta con un visor de microscopio, con el cual se determina la posición del eje.

Finalmente un sistema de lectura en la parte superior del tornillo, nos permite conocer (después de las transformaciones adecuadas y algunas reducciones), la cantidad de fuerza de gravedad que se debió agregar o sustraer para restaurar la posición nula u horizontal.

El tornillo y el sistema de palancas está calibrado para todo el rango de medición, basándose en la calidad de material usado y brindando largos períodos sin recalibración. La función de tercer orden de calibración para las lecturas (llamada calibración relativa), viene en forma de tabla del Laboratorio LCR y proporciona una aproximación ($\pm 1/20.000$) de la función real. Para ajustar esos valores relativos a unos absolutos, se debe obtener un factor escala para cada gravímetro. Este factor escala se determina realizando mediciones sobre un conjunto de estaciones con valor de gravedad conocida (líneas de calibración, mediciones absolutas, redes globales o regionales ajustadas). El valor de la diferencia de gravedad se conoce cuando el valor relativo de las lecturas es multiplicado por el factor de escala.

La precisión final está entre ± 0.1 a $\pm 0.5 \mu\text{ms}^2$ (Torge, 1992), teniendo en cuenta métodos cuidadosos de levantamientos de campo, de manera de eliminar otras fuentes de error. La posición de lectura cero tiene variaciones temporales debido a deriva de transporte y deriva del cero. Esta última deriva mencionada es causada por el envejecimiento del resorte y cercana a unos 5 a 10 μms^2 por mes (LCR, 1992). Otra fuente importante de errores surge en las condiciones de transporte del gravímetro, un transporte suave y estable del aparato evita choques y vibraciones, que puedan afectar el sistema de medición.

Basado en conceptos similares es el Gravímetro Worden, de Texas Instruments, EE.UU.-

Las diferencias con lo ya explicado para el LCR, están en el resorte vertical y el sistema de cuarzo usado en el eje horizontal. Los modelos de gravímetros pueden tener dispositivo de mantenimiento de temperatura o no. Esta clase de gravímetros fueron usados en los primeros intentos de establecer un Datum gravimétrico para Uruguay.

2.2 Mediciones de Gravedad Relativa en Uruguay

2.2.1 Determinaciones Gravimétricas Previas

La primera determinación gravimétrica bien documentada que se conoce, fue realizada el 18 de febrero de 1932 por el entonces Presidente de la UGGI, Prof. Vening Meinesz. Él usó un gravímetro tripendular con dispositivo fotográfico de registro de su propia invención, determinando a bordo de un submarino holandés un valor de 979760 mgals para el fondo de la Bahía de Montevideo.-

En la década de 1950, el Prof. N.C. Harding de la Universidad de Wisconsin, EE.UU., estableció un punto gravimétrico en el Aeropuerto de Carrasco, cercano a Montevideo, con la finalidad de completar un estudio geológico regional. El valor para ese punto fue de 979746,7 mgals.

Entre el 31 de julio y el 4 de agosto de 1962, la Facultad de Ingeniería (FIA) de Buenos Aires, Argentina, realizó un perfil submarino de 600 km., con el gravímetro “North American UW-2R”, el cual fue operado desde un barco de la armada de ese país. La Bahía de Buenos Aires y Cabo San Antonio en Argentina y el puerto de Montevideo en Uruguay, quedaron enlazadas, estableciéndose un nuevo punto en nuestro país.

2.2.2. Determinación del Datum Gravimétrico

Con la finalidad de establecer un Datum gravimétrico en Uruguay, las Universidades de Montevideo y Buenos Aires, realizaron un conjunto de enlaces aéreos con tres gravímetros Worden (los Nos. 51, 488 y 497). Se efectuaron tres enlaces diarios en dos días consecutivos entre los Aeropuertos de Carrasco y Ezeiza, agregándose enlaces entre los aeropuertos de ambas ciudades. De esa forma, agregando las observaciones submarinas ya hechas, se pudo cerrar el enlace con un error de $1,7 \mu\text{ms}^{-2}$, y otorgando el siguiente valor de gravedad a la estación

Estación Aeropuerto Carrasco (Subsuelo)	
Latitud Sur	: - 34° 50' 18"
Longitud Oeste	: - 56° 01' 18"
Altitud (NMM)	: 12,13 m
Valor Gravedad	: 979 7474,7 μms^{-2}

En 1967, el SGM de Uruguay, a cargo de la determinación del campo normal de gravedad, comienza una serie de levantamientos de campo, de manera de cubrir el país con estaciones gravimétricas. La planificación realizada incluyó un nuevo enlace con la Estación Absoluta de Miguelete en Buenos Aires, la división del país en 25 polígonos, superpuestos a la Red de nivelación de 1er. Orden, con un total de unas 900 estaciones (Red Gravimétrica Fundamental) y finalmente una densificación de los polígonos, visando obtener un punto de gravimetría cada 10 km. de distancia en todo el país.-

Se obtuvo un préstamo del Servicio Geodésico Interamericano (SGI) de la Agencia Cartográfica de Defensa de los EE.UU., el gravímetro LCR G61, y se realizaron los siguientes trabajos:

- cálculo del factor de escala para el G61, a través de una medición sobre una red de estaciones argentinas que comenzaban en Miguelete e incluían la estación Ezeiza.-
- dos enlaces en barco entre los puertos de Buenos Aires y Colonia en Uruguay (un viaje de sólo 45 minutos), usando los gravímetros G61 y el Worden 488 con termostato (Fig.3.)
- perfil gravimétrico Colonia-Aeropuerto Carrasco, a caballo de la línea de 1er. Orden en la ruta nacional N°1. Se usó método escalonado con estaciones cada 5 km. y 3 lecturas de unidades del contador (UC), con un máximo de 3 unidades de diferencia entre ellas y en un minuto de tiempo cada una. En la reducción de las observaciones se usó el factor de escala hallado y la atracción luni-solar.

Combinando estas nuevas observaciones con las conexiones aéreas, se halló un nuevo valor de $2 \mu\text{ms}^{-2}$ para el enlace, por lo que se decidió mantener el valor de G adoptado para la estación Aeropuerto Carrasco.

2.2.3 Establecimiento de la Red Gravimétrica Fundamental

El siguiente paso comenzó en junio de 1967 y finalizó en mayo de 1968. Los levantamientos de campo planificados tuvieron 45 líneas en los 25 polígonos mencionados y 35 nodales (intersección de dos o más líneas) y estaciones terminales. Cada línea tuvo estaciones espaciadas entre 3 y 5 km, se usó el método de perfil y se aceptó una discrepancia de recuperación de $0.5 \mu\text{ms}^{-2}$.

Se midieron un total de 924 estaciones con 4.490 km de líneas y más de 15.000 kms. viajados a lo largo de las líneas. Al finalizar esta etapa, se enlazaron por vinculación aérea 12 estaciones nodales de manera de verificar las diferencias de G establecidas.

El procesamiento de las observaciones incluyó el cálculo de la gravedad observada, verificación del ajuste de líneas y el Ajuste por Método de Mínimos Cuadrados de la red completa, obteniendo como resultado un valor de gravedad ajustado para cada estación. Se calcularon las anomalías Aire Libre y Bouguer, usando la fórmula Internacional de Gravedad de 1930 (Heiskanen y Cassinis). Finalmente se editó como información pública, una publicación con la Red Gravimétrica Fundamental completa, que incluyó estaciones, coordenadas, valores de gravedad y anomalías (SGM,1970) y en 1973 un mapa de anomalías cada 5 mgal escala 1/1:000.000.

2.2.4 Densificación de la Red

En 1984 se reasumieron las operaciones gravimétricas de campo. Otro gravímetro, esta vez el LCR G13, fue prestado por el SGI, adoptándose además un nuevo valor para el Datum ($G=9797325,5 \mu\text{ms}^{-2}$), al tomarse en cuenta el valor corregido en unos $150 \mu\text{ms}^{-2}$ de Postdam.

El factor escala fue calculado usando un conjunto de 7 estaciones, ubicadas de sur a norte del país y cuyo valor había sido obtenido del trabajo anteriormente mencionado. Al mismo tiempo se usó un nuevo programa de computadora para el cálculo de la atracción luni-solar, basado en el método de Longman (Journal of Geophysical Research, USA, 1959).

Se planificaron unas 1.300 nuevas estaciones, de manera de densificar los 25 polígonos. Se medirían por el método de perfil, con una reocupación mínima de 30% de las estaciones en la vuelta. El método de lectura fue el mismo usado en la Red Fundamental. Las estaciones se ubicaron entre 3 y 8 km de distancia entre ellas y se superpusieron a la red de Nivelación, se debió agregar un nuevo equipo de medición topográfica para otorgar coordenadas a las estaciones que se encontraban alejadas de caminos o de la red altimétrica. La disponibilidad de nuevos mapas escala 1/50.000 y fotos aéreas escala 1/10.000 y 1/20.00 fueron de gran utilidad en el caso de las coordenadas planas, pero en la mayoría de los casos el equipo topográfico tuvo que realizar un perfil vertical para obtener una altitud de precisión adecuada.-

En 1986, se agregó otro gravímetro LCR al equipo de levantamientos, el G703, de manera de agilizar la densificación, finalizándose los trabajos en 1988. En áreas inundables o de difícil acceso, se tuvo que desplegar un considerable esfuerzo para establecer las estaciones. Algunos números nos muestran el trabajo realizado.

- Estaciones nuevas establecida	: 1328
- Días de levantamiento de campo	: 308
- N° de estaciones por polígono	: 5,1
- Estaciones por día	: 4,3
- Densificación final	: 1 estación cada 78 km ²

El procesamiento de los datos incluyó un conjunto de programas para computadora, llamado GravSys, del Centro de Datos Gravimétricos de Ottawa, Canadá, de manera de calcular los valores de gravedad y las reducciones por estación. Nuevamente se calcularon las anomalías de Aire Libre y Bouguer, usando la Fórmula Internacional de Gravedad de 1980 (SRG80). Con la totalidad de la información, se creó un Centro Nacional de Datos Gravimétricos, en donde se incluye la designación, número de estación, coordenadas, altitud, valor de gravedad, anomalías y una descripción corta de cada estación. La información es pública, como una contribución a los programas de investigación científicos o técnicos.

2.2.5 Nuevos enlaces internacionales de gravimetría relativa

Mediante acuerdos de cooperación y trabajo del Servicio Geográfico Militar de Uruguay, el Observatorio Nacional (ON) de Río de Janeiro y la Universidad de San Pablo (USP), Brasil, el Instituto Geográfico Militar (IGM) y la Universidad de Rosario (UR), Argentina, se coordinaron y realizaron una serie de enlaces gravimétricos relativos entre julio y octubre de 1987. El propósito de estos enlaces fue establecer diferencias de gravedad entre las redes gravimétricas de dichos países y controlar el nivel y valor de gravedad para nuestro Datum. Uno de los puntos débiles de la red uruguaya era la permanencia del punto Datum con sólo los enlaces relativos de 1962 y 1967.

Cinco estaciones de Brasil, Uruguiana, Santana do Livramento, Bagé, Pelotas (IGSN71 Nr. 43812B) y Chui fueron enlazadas con la estación Aeropuerto de Carrasco, mediante cuatro enlaces, cada uno tocando 2 o 3 nodales en el recorrido (Fig.3). Cinco gravímetros LCR se usaron, siendo ellos los Nos. G602 y G622 del ON, Nr G454 de la USP, G013 y G703 del SGM. Cuatro observadores viajaron en automóvil más de 4.600 en 172 horas de trabajo para su ejecución.

Del lado argentino, se realizó un corto enlace entre las estaciones de Nodal Bella Unión (R) y Monte Caseros, tres gravímetros LCR, el N° G679 del IGM y UR y los dos del Servicio Geográfico Militar, realizándose un total de 6 enlaces. Las malas condiciones del camino entre Monte Caseros y la pista de aterrizaje de esa localidad, causaron problemas de estabilidad en el G679 que hicieron eliminar algunas observaciones de éste.

En el proceso de cálculo de los enlaces se encontró una diferencia de nivel de $-1.0 \mu\text{ms}^{-2}$ con los valores de gravedad previos, diferencia que no apareció del lado brasilero.

En 1989 se agregaron 4 nuevos enlaces con argentina, en acuerdo con el IGM y la Universidad de Tucumán (UT), aprovechando la existencia de una nueva estación absoluta en Paysandú y tratando de establecer enlaces más consistentes entre ambas redes. Cuatro gravímetros LCR, Nos. G013 y G703 del SGM, G679 (IGM) y G945 (TU), realizaron las siguientes líneas, mencionadas de sur a norte:

- Nodal Mercedes-Miguelete (IFE-N° 313)
- Paysandú (IF E-N°232)- Paraná
- Nodal Salto-Concordia
- Nodal Salto Monte-Caseros

Posteriormente se agregó con los gravímetros del SGM, un nuevo enlace entre Paysandú (IFE-N°232) y Toledo (IFE-N° 222). Debido a la falta de la tabla de calibración de los gravímetros argentinos en el momento del ajuste final, no se incluyeron en éste, procesándose sólo los gravímetros del SGM. Con toda esta cantidad de información relativa, absoluta y una buena calidad y distribución de estaciones, sólo se necesitaba una integración y ajuste final de la misma. A través de un acuerdo entre el Servicio Geográfico Militar y el Institut für Erdmessung (IFE), de la Universidad de Hannover, Alemania, el ajuste total fue realizado en mayo de 1995 en Hannover, con participación de expertos de ambas instituciones. Los resultados se discuten a continuación.

3. El ajuste de la Red Gravimétrica Uruguaya

El software de procesamiento usado para el procesamiento de todos los datos gravimétricos, fue el paquete GRAV (versión 1.5, autor: Prof. Dr.-Ing H.G. Wenzel, Universidad de Karlsruhe, Alemania). El software, programado en código FORTRAN 77, se ejecuta en dos etapas. Primero se realiza un preprocesamiento para obtener a priori, las lecturas calibradas, reducidas además por atracción luni-solar, presión atmosférica (opcional) y altura instrumental (opcional). A continuación en una segunda etapa, la red completa se procesa por el Método de Mínimos Cuadrados. La combinación de estaciones absolutas y relativas es totalmente posible. El paquete GRAV, está disponible para sistemas operativos UNÍS y MS-DOS, no habiendo limitaciones en el número de estaciones, gravímetros y mediciones absolutas, dependiendo sólo de la memoria RAM que el computador disponga.

3.1 Precalibración y reducciones

Las mediciones de gravedad originales de los gravímetros LCR, son lecturas en unidades de contador ($1 \text{ UC} \approx 10 \mu\text{ms}^{-2}$ para los modelos G). El fabricante provee de una tabla de calibración para cada instrumento de este modelo. La observación calibrada inicial es obtenida por:

$$z' = F(z), \text{ con } F(z): \text{ función de calibración de fábrica} \quad (3.1)$$

Generalmente la tabla tiene una precisión superior a 1.10^{-3} en escala.

Z' es una función de tiempo t, debido a que la medición se ve afectada por cambios en el nivel de aguas, presión atmosférica y variaciones de mareas terrestres (correspondientes a 1.3.2). Se asumió una constante instrumental de altura y un gradiente vertical para todos los gravímetros. Las incertidumbres debido a estos supuestos pueden causar errores de hasta $0.1 \mu\text{ms}^{-2}$ en algunos casos los cuales no pudieron ser evitados.

3.2 Ecuación de Observación

Para la realización de mediciones de gravedad más precisas, el observador debe determinar una mejora a la función de calibración. El ajuste del sistema de palancas para diferentes lecturas es modelado matemáticamente por una función polinómica de orden bajo. Los errores periódicos debidos al tornillo de medición o excentricidades del sistema, no pueden ser determinados a partir del ajuste de red. Debido a que en Uruguay no existe una línea de calibración para errores periódicos, es posible tener indeterminaciones de más de $0.1 \mu\text{ms}^{-2}$ en los resultados de gravedad, especialmente cuando un punto es ocupado por un solo gravímetro (no hay minimización de errores por promedios).

La ecuación de observación para una medición individual está dada por:

$$l = g - N_0 - Y \cdot z' .$$

La observable l, corresponde a la medición precalibrada $z' \cdot g$ (valor de gravedad del punto), N_0 (nivel del instrumento, variable con el tiempo) e Y (factor d calibración definido por el observador) son las incógnitas a ser determinadas. En Uruguay, la máxima diferencia de gravedad es de $\sim 5000 \mu\text{ms}^{-2}$. Por lo tanto un factor único Y es suficiente para la función de calibración del usuario.

Para minimizar el número de incógnitas en el modelo de ajuste, se introduce la diferencia de medición entre dos estaciones adyacentes i y j como “cuasi” observaciones.

$$\Delta l_{ij} = l_i - l_j = g_j - g_i - Y \cdot (z'_j - z'_i). \quad (3.3)$$

El comportamiento de la deriva (cambio dependiente del tiempo de N_0) de un gravímetro puede ser modelado como $N_0 = N_0(t)$ en momentos de medición continua (un día), si es necesario se pueden realizar observaciones redundantes. Para la red de Uruguay, el modelado de la deriva no arrojó resultados consistentes, por lo tanto no fue considerado en la ecuación de observación del ajuste final.

3.3 Ajuste de la red

La Red Gravimétrica Nacional de Uruguay, (observada entre 1967 y 1993) fue evaluada en un ajuste común de todas las mediciones relativas y absolutas disponibles. Un total de 5447 mediciones de gravedad relativa fueron introducidas, sirviendo 4 estaciones absolutas (Paysandú, Rivera, Toledo y Buenos Aires) como nivel y escala para la red, ver Cap. 1.2. Para las observaciones absolutas, la ecuación de observación en el ajuste de red es simplemente

$$L_{\text{Estac}} = g_{\text{Estac}, h=0,000\text{m}} \cdot \quad (2.4)$$

La tabla 2 resume los detalles del ajuste. El rango total de gravedad es de $4914 \mu\text{ms}^{-2}$, el cual está cubierto por las estaciones absolutas. Para cada gravímetro relativo fue ajustado un factor de calibración para mejorar la tabla de calibración del fabricante.

Número de ...	
Estaciones de Gravedad Absoluta	4
Estaciones de Gravedad Relativa	2376
Gravímetros Absolutos	1
Gravímetros Relativos	8
Diferencias de Gravedad Observadas	5447
Incógnitas del Ajuste	

Tabla 2. Detalles del Ajuste de la Red Gravimétrica Nacional de Uruguay

En el modelo estocástico, los valores absolutos fueron introducidos con una desviación estándar de $0.08 \mu\text{ms}^{-2}$ (estimación empírica), mientras que se asumió $0,50 \mu\text{ms}^{-2}$ para las observaciones relativas durante el primer paso de la evaluación. Las diferencias de gravedad al tener en común una lectura (Δ_{ij} y Δ_{jk}) están matemáticamente correlacionadas por $-0,5$. esto puede ser tomado en cuenta en el ajuste del modelo estocástico. Además la correlación física existe aunque normalmente no es conocida. Numerosos ajuste de red realizados en el IFE, muestran que al despreciar las correlaciones no se introducen cambios significativos en los valores de gravedad ajustados. Para la red uruguaya no se introdujeron correlaciones entre las observaciones relativas, ni entre las absolutas.

Después del primer paso de ajuste, se calculó una desviación estandar a posteriori para cada gravímetro LCR, este valor difiere normalmente de la precisión inicial estimada. Para lograr un peso adecuado entre lecturas de diferentes gravímetros, se realizó una iteración, introduciendo la desviación obtenida $D_{a \text{ posteriori, inst}}$, en la siguiente iteración como $D_{a \text{ posteriori, inst}}$. La iteración se detiene cuando ambas desviaciones concuerdan en un valor inferior a $5 \mu\text{ms}^{-2}$.

Durante la iteración se pudieron identificar algunos errores, la mayoría de digitalización de los archivos originales (errores de copiado). Después de comparar con los archivos de campo originales, casi todas las discrepancias grandes (algunos $0.1 \mu\text{ms}^{-2}$). Finalmente 15 conexiones con faltas y gruesos errores fueron detectados y eliminados, esto supone sólo un 0,3% del total de la base de datos disponible, ver Tabla 3.

N° Gravímetro LCR	N° Observ. Usadas	Porcentaje Usado	Observaciones rechazadas	Porcentaje rechazo
G 013 (SGM)	2152	39,5	7	0,3
G 061 (SGM)	2314	42,5	4	0,2
G 703 (SGM)	881	16,2	2	0,2
G 945 (UT)	6	0,1	-----	-----
G 622 (ON)	32	0,6	-----	-----
G 602 (ON)	32	0,6	-----	-----
G 454 (USP)	18	0,3	-----	-----
G 679 (IGM)	12	0,2	2	14,3
TOTAL	5447	100	15	0,3

Tabla 3: Número de diferencias de gravedad usadas y rechazadas en el ajuste de la red

4. Resultados

4.1. Mediciones de Gravedad Absoluta

En la tabla 4 se condensan los resultados de las determinaciones absolutas en Uruguay, además se muestra el valor absoluto de Buenos Aires.

Estación	N° IFE	Fecha	ϕ (grados)	λ (grados)	H (m)	dg/dH (μms^{-2})m	g_{terr} (μms^{-2})
Rivera	212	3/89	- 30,90	304,46	213	- 3,08	9793443,77
Toledo	222	3/89	- 34,74	303,91	65	- 3,07	9797158,55
Toledo	222	12/91	- 34,74	303,91	65	- 3,07	9797158,56
Paysandú	232	12/91	- 32,38	301,97	61	- 3,04	9795235,26
Buenos Aires	313	11/91	- 34,57	301,48	13	- 2,48	9796891,41

Tabla 4: resultados de gravedad absoluta de Uruguay y Buenos Aires 1989/1991

Hay un acuerdo excelente entre las dos determinaciones absolutas de Toledo, de sólo 0.01 μms^{-2} .

En Buenos Aires se ocuparon dos sitios absolutos adyacentes en 1989 y 1991, debido a que el primero se encontró con problemas de inundación de aguas, la distancia entre ellos es de unos 200m. La conexión entre los dos lugares por gravimetría relativa tuvo un acuerdo de 0.04 μms^{-2} .

En Montevideo se realizó un enlace con una estación RELANG 77 (Red Latinoamericana de Normalización de Gravedad 1977, McConnel y otros, 1979) (LAGSN77), la cual se basa en IGSN 77, este enlace dio una discrepancia de $-0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ (JILAG-3- RELANG77), ver Tabla 5. finalmente un enlace relativo a una estación IGSN71 en Buenos Aires, dio como resultado una diferencia (JILAG-3 –IGSN71) de $+0.04 \mu\text{ms}^{-2}$.

Estación	Nº IFE	g IFE (89/91) (μms^{-2})	g RELANG77 (μms^{-2})	g IGSN71 (μms^{-2})	$\Delta\text{g}_{\text{IFE-red}}$ (μms^{-2})
Montevideo (exc)	223	9797324,14	... + 4,6	/	-0,5
Buenos Aires (*)	311	9796900,71	/	...+0,3	+0,4

(*) Estación Datum gravimétrico IGSN71 “Buenos Aires A” en Miguelete

Tabla 5. Comparación entre JILAG-3 y los Datums definidos previamente

Estas comparaciones muestran la mejora del nivel de la gravimetría absoluta al emplearse el equipamiento de última tecnología. Otras conexiones entre JILAG-3 y las redes nacionales existentes en Sudamérica (ver Torge y otros, 1994) también indican que el nivel absoluto de las redes basadas en IGSN71, es correcto dentro de algunos $0,1\mu\text{ms}^{-2}$, con algunos desvíos locales de hasta 0,4 a $0,5 \mu\text{ms}^{-2}$. Los errores de escala pueden ser de 10^{-4} en las redes, mientras la precisión relativa es de algunos $\pm 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$.

En la figura 3, se presentan los histogramas y diagramas de dispersión de las observaciones para las cuatro determinaciones absolutas en Uruguay. Los gráficos para Toledo de 1989 y 1991 son especialmente interesantes, a pesar de no haber ningún cambio en las condiciones de la estación (de estabilidad, por ej.), la dispersión de las mediciones de 1991 es 3 veces más grande que la de 1989. No se visualiza tampoco el pequeño comportamiento periódico de las secuencias de caída de las dos ocupaciones de 1989. Esto podría tener como causa, cambios instrumentales en el JILAG-3. Como control adicional, la estación de referencia del JILAG-3, Clausthal, en Alemania ha sido ocupada antes y después de cada campaña y desde 1987 no se han podido detectar cambios instrumentales.

En el Anexo 1, se muestran los resultados de las mediciones absolutas en más detalle, el cálculo de las mismas se mencionó en 1.3.3. Debe mencionarse además que la desviación estándar de la media, resultante de Toledo 1991 ($D_{\text{med}} = 0,028 \mu\text{ms}^{-2}$), es menor que la 1989 ($D_{\text{med}} = 0,042 \mu\text{ms}^{-2}$). Este hecho estaría mostrando la influencia de errores sistemáticos, no eliminados completamente en el promedio del conjunto de 300 caídas.

4.2 Red Gravimétrica Nacional

El ajuste final de la red de gravedad fue realizado introduciendo los 4 puntos con

observaciones absolutas y a continuación el procedimiento explicado en el capítulo 3.3, ver Tabla 4. En la estación Toledo, se promediaron las observaciones de 1989 y 1991. La desviación estándar para las 2376 estaciones resultó de $0,26 \mu\text{ms}^{-2}$, los valores máximos y mínimos alcanzados fueron de $0,56$ y $0,06 \mu\text{ms}^{-2}$ respectivamente. La Tabla 6 nos da la precisión estimada para las lecturas de cada gravímetro y el factor de calibración lineal ajustado correspondiente. Las imprecisiones del G679, se deben al hecho de que su factor de calibración fue obtenido de 12 observaciones realizadas en un enlace entre dos estaciones con una diferencia de gravedad de sólo $7 \mu\text{ms}^{-2}$.

Gravímetro LCR N°	Desviación estándar de las mediciones (μms^{-2})	Factor de calibración ajustado
G 013	$\pm 0,24$	$0.99871 \pm 0,00004$
G 061	$\pm 0,25$	$1.00033 \pm 0,00007$
G 703	$\pm 0,17$	$1.00049 \pm 0,00004$
G 945	$\pm 0,50$	$1.00081 \pm 0,00016$
G 622	$\pm 0,38$	$1.00043 \pm 0,00008$
G 602	$\pm 0,36$	$1.00029 \pm 0,00007$
G 454	$\pm 0,28$	$1.00023 \pm 0,00007$
G 679	$\pm 0,42$	$1.00934 \pm 0,01803$

Tabla 6: desviación estándar de una medición de los gravímetros LCR y factores de calibración ajustados.

El gravímetro LCR G 945 ha sido usado sólo en 6 conexiones, por lo que no se pudo hallar una estimación de precisión confiable y se le mantuvo la desviación estándar a priori de $0,50 \mu\text{ms}^{-2}$.

Como la red está determinada principalmente por las observaciones de los LCR G 013, 061 y 703, la desviación estándar de ellos es de unos $0,2 \mu\text{ms}^{-2}$, nos está indicando la buena calidad de las observaciones en un lapso de 26 años. La precisión no es dependiente del tiempo, como se pudo comprobar en este ajuste, sino de la calidad de ejecución de las observaciones.

Los residuos de las estaciones absolutas se muestran en la Tabla 7, no fue posible controlar estas mediciones por los enlaces relativos, debido a que los gravímetros LCR no fueron forzados por una calibración definida a priori. La conexión a Buenos Aires es bastante débil, en cambio las conexiones a Brasil permiten una comparación con la red del país vecino.-

Estación	Nº IFE	Residuales del Ajuste (μms^{-2})	Med.Grav.Absoluta ajustadas (μms^{-2})	Nº Enlaces relativos
Rivera	212	- 0,02	9793443,75 \pm 0,08	22
Toledo	222	- 0,01	9797158,55 \pm 0,07	18
Paysandú	232	+0,05	9795235,31 \pm 0,06	12
Buenos Aires	313	- 0,03	9796891,38 \pm 0,07	2

Tabla 7: Resultados del ajuste de red para las estaciones absolutas y número de conexiones relativos a otros puntos de la red.

La red de Uruguay está conectada a 5 estaciones gravimétricas en Brasil y 2 en Argentina, sin contar la absoluta IFE- Nº 313. Esto permite la comparación con las redes fundamentales de los países vecinos. La Tabla 8 nos muestra la diferencia en valores de gravedad ajustados entre la red de Uruguay con Brasil y Argentina. La Red Gravimétrica Fundamental de Brasil está basada en un ajuste de 1986 sobre 15 estaciones IGSN71 y la argentina sobre RELANG77, como se explicó anteriormente. De la Tabla 8 se puede apreciar una diferencia casi homogénea con los dos países de aproximadamente $- 1.0 \mu\text{ms}^{-2}$, sólo la estación argentina de Paraná parece diferir.

Diferencias de Gravedad Ajustadas (Uruguay menos Brasil o Argentina)				
Nombre de la Estación	ϕ (Grad.)	λ (Grad.)	H (m)	DIF. (μms^{-2})
Uruguaiana, Brasil	- 29,74	302,91	60,34	- 1,2
Livramento, Brasil	- 30,90	304,50	183,58	- 0,7
Bagé, Brasil	- 31,30	305,90	202,63	- 0,9
Pelotas, Brasil	- 31,80	307,70	10,99	- 0,5
Chuí, Brasil	- 33,70	306,50	13,39	- 0,8
Monte Caseros, Argentina	- 30,26	302,37	52,97	- 0,5
Paraná, Argentina	- 31,78	299,53	59,98	+ 0,3

Tabla 8: Comparación con países limítrofes

Debido a las mediciones absolutas del JILAG-3, la Red Gravimétrica Nacional de Uruguay, también está referida a la IAGBN (International Absolute Gravity Basestation Network, Boedecker y Fritzer, 1986) y de esta forma contribuye al establecimiento de una red de gravedad en Sudamérica, de buena calidad y más homogénea, con una precisión $\pm 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$, o mejor. Esto se corresponde además, con las más recientes redes de gravedad establecidas en otras partes del mundo.

5. La línea de calibración gravimétrica en Uruguay

La evaluación de la red gravimétrica de Uruguay permitió al mismo tiempo, definir una línea de calibración de precisión para gravímetros relativos. La línea se extiende en la dirección sur-norte, comprendiendo 7 estaciones con un rango de gravedad de $3751 \mu\text{ms}^{-2}$ (diferencia de gravedad entre las estaciones de Toledo y Rivera). Las estaciones intermedias están localizadas en Iglesias y edificios públicos con referencias internas y externas, siendo puntos nodales de la red. Los valores de gravedad de cada estación se dan en la siguiente Tabla 9.-

Estación	N° SGM	Valor Gravedad	Enlaces
Toledo Absoluta (IFE 222)	0003	$9797158,55 \pm 0,07$	18
Nodal Durazno	0017	$9795969,03 \pm 0,06$	87
Nodal Peralta	0027	$9795051,66 \pm 0,11$	20
Nodal Curtina	0015	$9794625,98 \pm 0,11$	17
Nodal Tacuarembó	0038	$9794219,66 \pm 0,07$	90
Nodal Empalme R-5 y R-27	0019	$9793407,92 \pm 0,11$	46
Rivera Absoluta (IFE 212)	0004	$9793443,75 \pm 0,08$	22

Tabla 9: La línea de calibración en Uruguay (rango de gravedad de $3751 \mu\text{ms}^{-2}$)

Desviación estándar depende de la precisión de las estaciones absolutas ($0,08 \mu\text{ms}^{-2}$) y la ubicación y cantidad de enlaces con la red. Nótese que los puntos Nodal Durazno y Nodal Tacuarembó son de una alta precisión, similar a la de las estaciones absolutas, lo cual se corresponde además con la gran cantidad de enlaces que poseen (aprox. 90 cada uno).

La Tabla 10, nos da la precisión en las diferencias de gravedad entre estaciones de la línea de calibración. Estas precisiones de la matriz da cofactores del ajuste de la red y considerando la correlación entre las dos estaciones que correspondan. Al usarse esta línea de calibración, el factor escala de los gravímetros relativos como los LCR, se puede determinar con una precisión relativa de algunas partes de 10^{-5} .

Nº Est. SGM	003	0017	0027	0015	0038	0019	0004
0003	----	± 0,06	± 0,12	± 0,13	± 0,10	± 0,14	± 0,11
0017	± 0,06	-----	± 0,10	± 0,11	± 0,07	± 0,11	± 0,09
0027	± 0,12	± 0,10	-----	± 0,12	± 0,10	± 0,13	± 0,11
0015	± 0,13	± 0,11	± 0,12	-----	± 0,10	± 0,12	± 0,11
0038	± 0,10	± 0,07	± 0,10	± 0,10	-----	± 0,07	± 0,05
0019	± 0,14	± 0,11	± 0,13	± 0,12	± 0,07	-----	± 0,08
0004	± 0,11	± 0,09	± 0,11	± 0,11	± 0,05	± 0,08	-----

Tabla 10: Desviación estándar de las diferencias de gravedad entre estaciones de la Línea de Calibración de Uruguay

6. Referencias

- Boedecker, G. And Fritzer, Th (1986). International Absolute Gravity Basestation Network. I.A. G-SSG 3.87 Status Report March 1986. Veröff. Bayer. Komm für die Inernat. Erdmessung bei der Bayer. Akad.d. Wissensch. Astro-Geod.Arb., 47, Munchen.
- Cartwright, D.E. and Edden, A.C. (1973), Corrected tables of tidal harmonics, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 33, 253-264, Oxford.
- Cartwright, D.E. and Taylor, R.J. (1971). New computations of tide generating potencial, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 23, 45-47, Oxford.
- Faller, J.F. Guo. Y. G.Gschwind, J. Niebauer, T.M., Rinker , R.L. and Xue, J. (1983). The JILA portable absolute gravity apparatus, Bur.Grav.Int, Bull d'Inf. 53, 87-97.
- LaCoste & Romberg Gravity Meters, Inc. (1992), Instruction Manual, Models G and D Gravity Meters, Austin, Texas, U.S.A.
- MacConnel, R.K. Winter , P.J and Geller, R.F. (1979). Latin American Gravity Standardization Network 1977 (LAGSN 77), Earth Physics Branch, Ottawa, Canada.
- Melchior. P.Ducarme B., van Ruymbeke, M.and Poitevin, C. (1984). Trans world tidal gravity profiles, Obs. Royal de Belgique, Bull. D'Obser.: Marées terrestres, Vol. V, Fasc. 1, Section Geodynamique, 1-102.-
- Observatorio Nacional (1986), Rede Gravimetrica Fundamental Brasileira 1976-1986, Rio de Janeiro, 1986.
- Rapp, R.H. (1983). Tidal gravity computations based of recommendations of the Standard Earth Tide Committee, Bulletin d'Informations Marées Terrestres89, 5814-5819, Bruxelles.
- Röder, R.H., Schnüll and M., Wenzel, H.G (1988). SWR- feedback for LaCoste-Romberg gravimeters with extended range, Bur.Grav.Int.Bull,d'Inf. 62, 46-50.
- Servicio Geográfico Militar (1970), Red Gravimétrica Fundamental-Resumen de Valores. Montevideo- Uruguay, 1970
- Torge, W. (1991). The present state of absolute gravimetry, conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 3, 9-22.
- Torge, W., Röder R.H. Schnüll, M., Wenzel, H.-G and Faller, J.E. (1987). First resu lt wit h the transportable absolute gravity meter JILAG-3, Bull.Géod.61, 161-176.
- Torge, W., Timmen, L., Röder, R.H., Schnül, M.(1994). The IFE Absolute Gravity Program "South America" 1988-1991, Veröff, Deustche Geod. Komm. Bei der Bayer. Akad. D. Wissensch., Teihe B299, München.

**Resultados de las mediciones de gravedad absoluta en la
Red Gravimétrica Nacional de Uruguay entre 1989 y 1991**

Corrida	Fecha	Caídas	$g_{h=0,805}$ (μms^{-2})	$D_{\text{caída}}$ (μms^{-2})	g_{terr} (μms^{-2})
1	890318	266	9793441,27	0,52	9793443,75
2	890319	276	9793441,26	0,52	9793443,74
3	890319	273	9793441,32	0,47	9793443,80
4	890319	280	9793441,32	0,40	9793443,80
5	890319	275	9793441,26	0,50	9793443,74
Estación Rivera (IFE 212)		1370	9793441,29 dg/dh = -3,08 $\mu\text{ms}^{-2}/\text{m}$		9793443,77 D = $\pm 0,031$ D_{med} = $\pm 0,028$

Corrida	Fecha	Caídas	$g_{h=0,812}$ (μms^{-2})	$D_{\text{caída}}$ (μms^{-2})	g_{terr} (μms^{-2})
1	890323	289	9797156,11	0,47	9797158,60
2	890323	289	9797156,17	0,53	9797158,66
3	890324	289	9797156,13	0,47	9797158,62
4	890324	288	9797156,08	0,50	9797158,57
5	890324	290	9797155,92	0,62	9797158,41
6	890324	289	9797155,94	0,50	9797158,43
Estación Toledo (IFE 222)		1724	9797156,06 dg/dh = -3,07 $\mu\text{ms}^{-2}/\text{m}$		9797158,55 D = $\pm 0,104$ D_{med} = $\pm 0,042$

Anexo I (Continuación)

Corrida	Fecha	Caídas	$g_{h=0,916}$ (μms^{-2})	$D_{\text{caída}}$ (μms^{-2})	g_{terr} (μms^{-2})
1	911217	294	9797155,79	2,43	9797158,60
2	911217	276	9797155,67	1,38	9797158,48
3	911217	291	9797155,83	1,07	9797158,64
4	911217	267	9797155,72	0,86	9797158,53
5	911217	267	9797155,76	1,68	9797158,57
Estación Toledo (IFE 222)		1424	9797155,75 dg/dh = -3,07 $\mu\text{ms}^{-2}/\text{m}$		9797158,56 D = $\pm 0,062$ D_{med} = $\pm 0,028$

Corrida	Fecha	Caídas	$g_{h=0,916}$ (μms^{-2})	$D_{\text{caída}}$ (μms^{-2})	g_{terr} (μms^{-2})
1	911213	110	97975232,66	0,74	9795235,44
2	911213	135	97975232,05	0,65	9795234,83
3	911213	192	97975232,34	0,77	9795235,12
4	911214	203	97975232,49	0,61	9795235,27
5	911214	189	97975232,47	0,81	9795235,25
6	911214	224	97975232,46	1,33	9795235,24
7	911214	251	97975232,54	0,75	9795235,32
8	911214	239	97975232,60	0,65	9795235,38
9	911214	236	97975232,68	1,25	9795235,46
10	890324	254	97975232,60	1,06	9795235,38
Estación Paysandú (IFE 232)		2033	9795232,48 dg/dh = -3,04 $\mu\text{ms}^{-2}/\text{m}$		9795235,26 D = $\pm 0,185$ D_{med} = $\pm 0,059$