

PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA

MEDICIONES DE GRAVEDAD

Medición de la gravedad

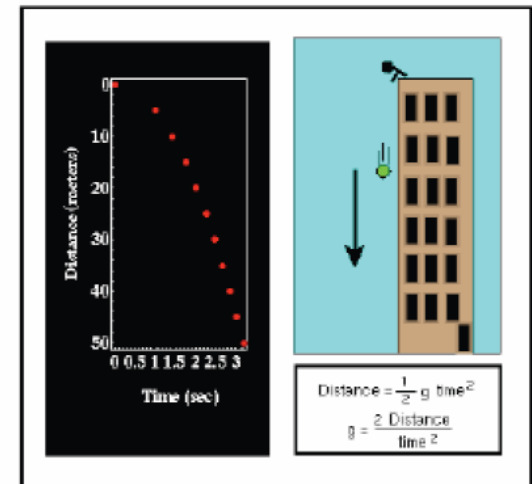
Mediciones absolutas:

aceleración de una masa en caída libre

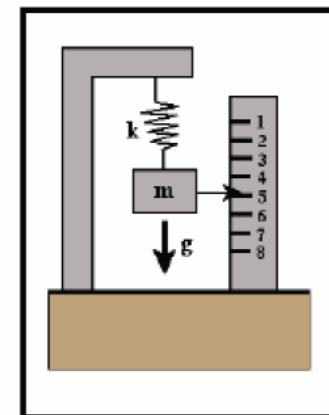
período de un péndulo

Mediciones relativas: (se necesita sitios de referencia donde gravedad absoluta es conocida)

- 1) Extensión de un resorte
- 2) Levitación de una masa metálica en un campo electromagnético



absolute measurement



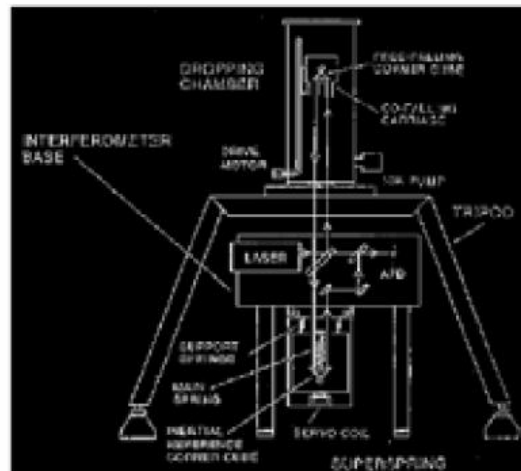
relative measurement

Medición absoluta de la gravedad

En tierra, las modernas determinaciones absolutas de g se realizan hoy utilizando caída libre. Las notables precisiones en las mediciones de tiempos (10^{-12} seg.) y distancias (10^{-10} m) que se logran en laboratorios de física han hecho posible determinar rápidamente g con precisiones de ± 0.01 mGal y aún mejores.

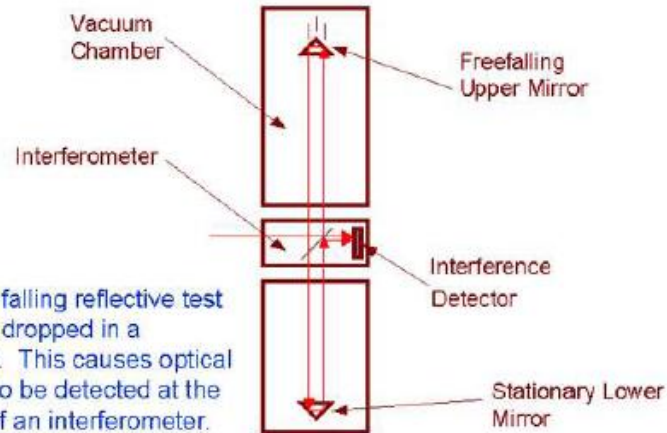
Precisión 1 microGal

Las distancias se miden con interferómetros de luz láser y como vimos con precisiones de 0.2 nm., mientras que los tiempos se miden con relojes de rubidio con 0.2 ns. de precisión.





FG-5 Principle of Operation



A freely falling reflective test mass is dropped in a vacuum. This causes optical fringes to be detected at the output of an interferometer. This signal is used to determine the local gravitational acceleration.

Micro-g Solutions: gravímetros absolutos portátiles

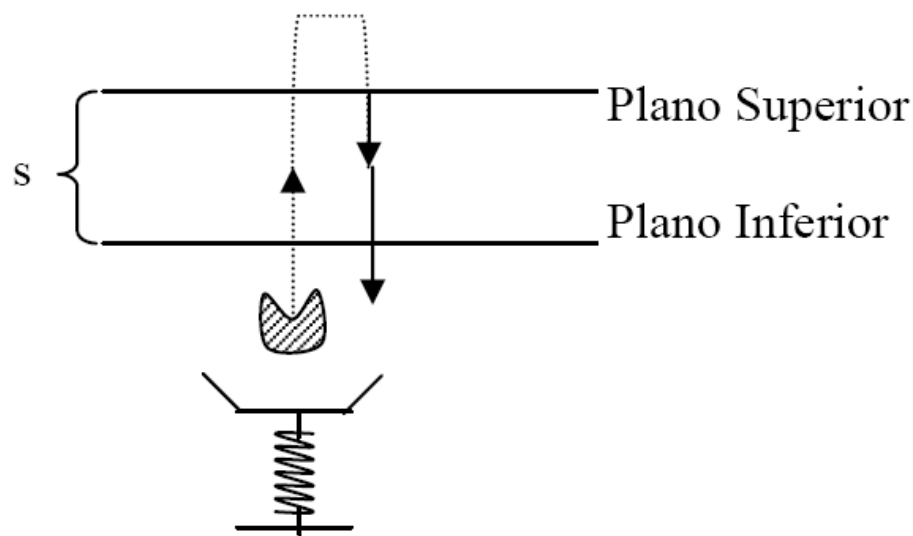
Detectan diferencia de $1\mu\text{Gal} = 0.001\text{ mGal}$

$dg = 1/10^{-9}$

Lento: medio día a un día por estación

Siempre hacia adelante





Cómo se trabaja?: Se catapulta un prisma trirrectangular hacia arriba. El prisma atraviesa dos veces, hacia arriba y en caída los planos (superior e inferior).

S es la longitud entre los planos y t_1 y t_2 son los intervalos de tiempo que transcurren al pasar dos veces por el plano superior e inferior respectivamente.

Péndulo Físico:

El péndulo físico es un cuerpo rígido con forma y distribución de masa M arbitrarias, bajo la influencia de la gravedad g , oscila alrededor de un eje horizontal O que no coincide con su centro de gravedad C . Si se desvía el péndulo de la dirección de la plomada (posición de equilibrio) el péndulo oscilará con período T_1 o T_2 según se suspenda del eje O_1 u O_2 .

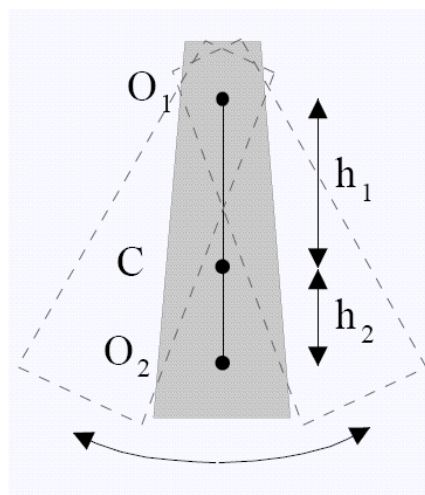


Figura III.5: Péndulo físico.

La expresión del período correspondiente a un péndulo físico de abertura pequeña es:

$$T_o = 2.\pi\sqrt{\frac{l_{eq}}{g}} \quad \text{o} \quad g = 4.\pi^2 \frac{l_{eq}}{T_o^2} \quad (\text{III.2})$$

La longitud equivalente es $l_{eq} = \frac{1}{M.h_1}$

Hoy se logran precisiones muy altas en las mediciones del tiempo y de la distancia. Con ellas podríamos así conseguir precisiones muy altas en las determinaciones de g , del orden de una parte en 10^8 o 10^{-8} .

Existen péndulos portátiles para medir “ g ”. No obstante, este método lidia con muchos problemas operativos. Por ejemplo, a menudo se alude a las deformaciones del péndulo y del soporte durante las mediciones. Además se requieren 15 a 20 minutos para obtener el promedio de T con las precisiones ya señaladas.

Medición de la gravedad

1. Cronometrando tiempo de **caída de un objeto** – puede se hecho en forma precisa en laboratorio pero no resulta práctico para el campo. Se mide la gravedad absoluta.
2. Medición del **período de un péndulo**. Igual que en 1, se reproduce en laboratorio pero es poco práctico para el campo. También mide la gravedad absoluta.
3. Uso de un resorte. Mide gravedad relativa, es decir variaciones de gravedad con respecto a otra estación de gravedad conocida.

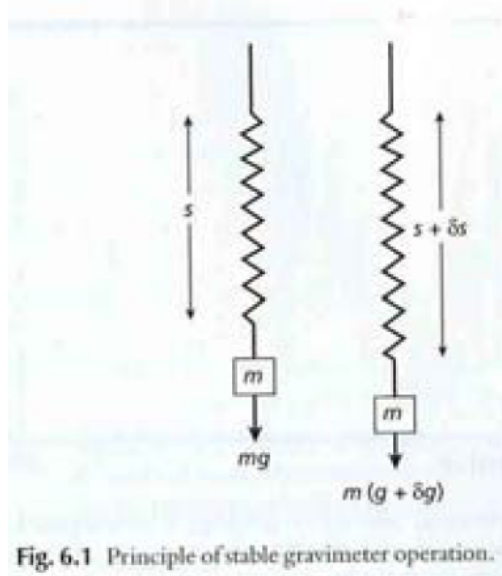


Fig. 6.1 Principle of stable gravimeter operation.

Un incremento en la aceleración de la gravedad causa un aumento en el peso que produce la masa ($m \times \Delta g$) generando un extra de estiramiento Δs en el resorte de largo s que la sostiene.

La extensión del resorte es proporcional a la fuerza que lo extiende (ley de Hooke).

$$m\Delta g = k\Delta s \quad \text{y} \quad \Delta s = \frac{m}{k}\Delta g$$

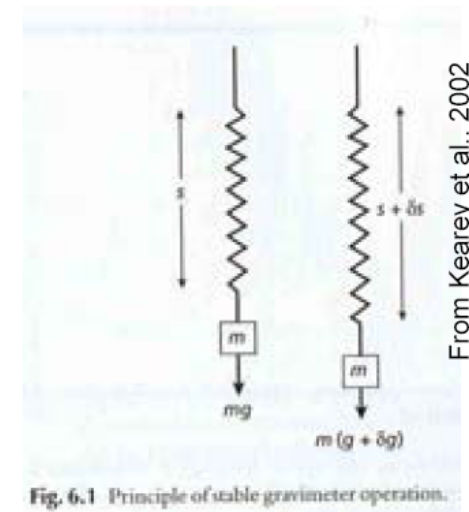
k es la constante elástica del resorte

Medición de la gravedad

La extensión del resorte Δs , es medida con una precisión de $1:10^8$ en los relevamientos de densidad realizados en tierra

Esto equivale a medir una distancia de 80 km con una precisión de 0.8 mm.

Los primeros gravímetros (**gravímetros estables**) medían con un dispositivo como el que se muestra, en el cual el resorte, del cual pende una masa, se estira diferencialmente en respuesta a un peso que varía según como varía g . Sin embargo se trata de un **dispositivo primitivo**, *ya que el resorte es el instrumento de medición y al mismo tiempo soporte de la masa*, lo cual le quita precisión a la medición.



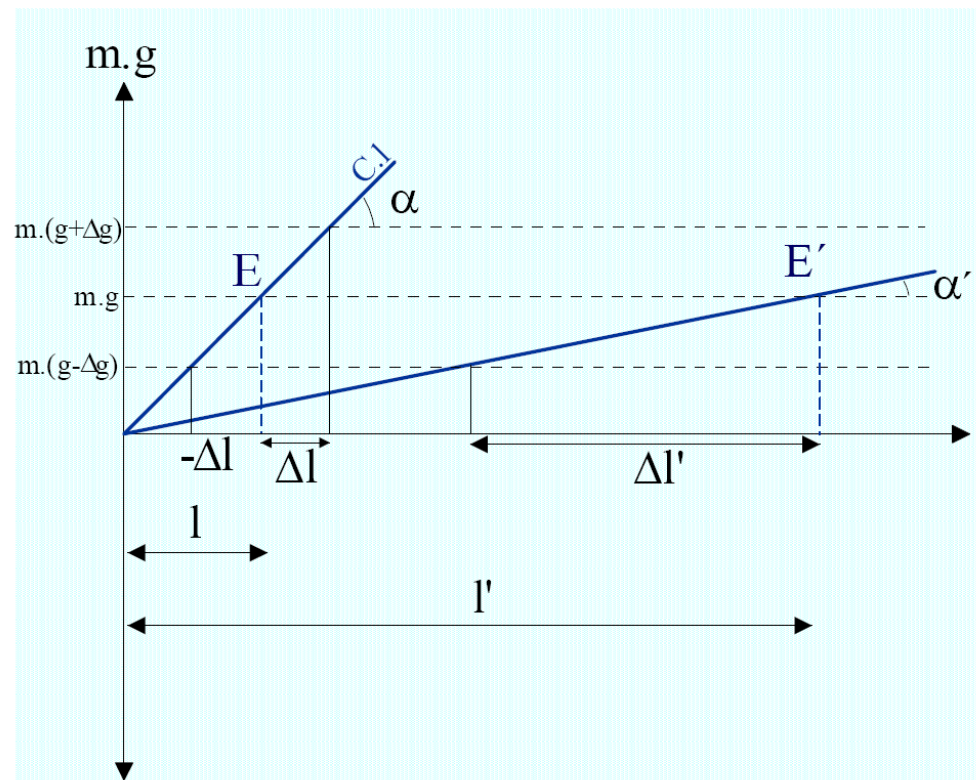
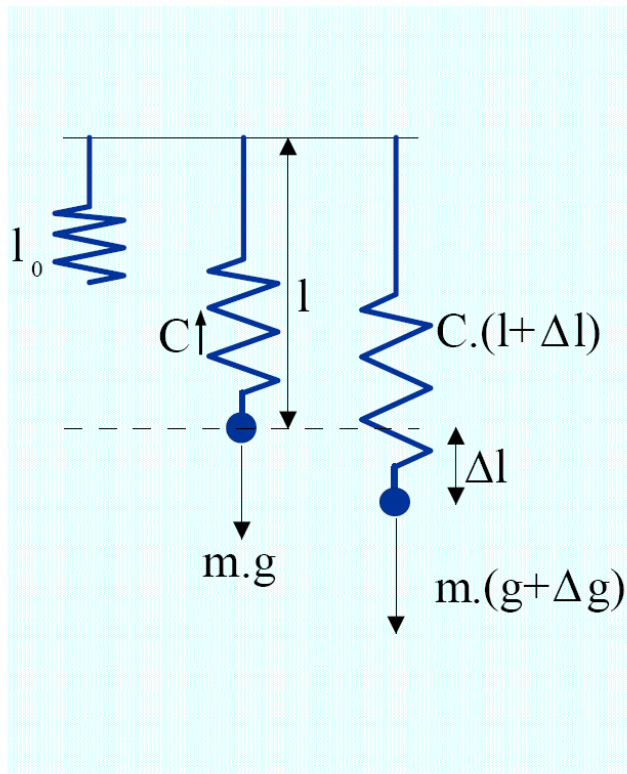


Figura III.7: Izquierda: esquema de sistema de balanza vertical. Derecha: sensibilidad del sistema ante estiramientos $\Delta l'$ para dos resortes con distinta constante de recuperación elástica C .

Pretensando adecuadamente el resorte:

$$l_0 = 0$$

Siguiendo la ley de Hooke el esfuerzo es proporcional a la deformación para pequeñas elongaciones:

$$m.g = C.l$$

$$m.\Delta g = C.\Delta l$$

Donde: l_0 longitud inicial del resorte; C : constante de recuperación elástica del resorte; l : longitud de referencia del resorte; m : masa; Δl : variación de la longitud del sistema elástico de una estación de medición a otra como efecto de la variación del campo gravitatorio Δg .

Un resorte lineal exige disponer de una gran longitud ($l' \gg l$ en la figura de la derecha) para que la sensibilidad $d\alpha$ aumente ($\alpha' \ll \alpha$ ó $[\Delta l'] \gg [\Delta l]$)

Medición relativa de la gravedad

Masas móviles aferradas a un resorte

1) **estable**: medición de la extensión del resorte

2) **inestable**: medición del desplazamiento necesario

aplicable a un resorte para devolverlo a su posición de equilibrio

-propiedades mecánicas de resorte dependen de temperatura
(portan un termostato)

-se necesita nivelamiento perfecto

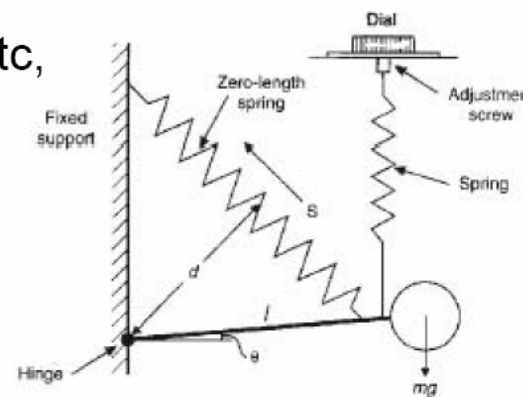
-elasticidad de los resortes varia con la edad

drift del instrumento (complejo, depende de la edad, etc,
es específica de cada gravímetro)

Poseen precisiones del orden de los 0.01 mGal



LaCoste & Romberg gravimeter



Gravímetros inestables

El problema del doble rol que cumplía un resorte es resuelto a través de un dispositivo denominado gravímetro inestable.

- Una vara fija sostiene en su extremo la masa y la vara se sostiene con un resorte. Ambas se adosan a una misma superficie vertical.
- La magnitud del momento que ejerce el resorte sobre la vara es proporcional a la extensión que sufre el resorte y el seno del ángulo θ .

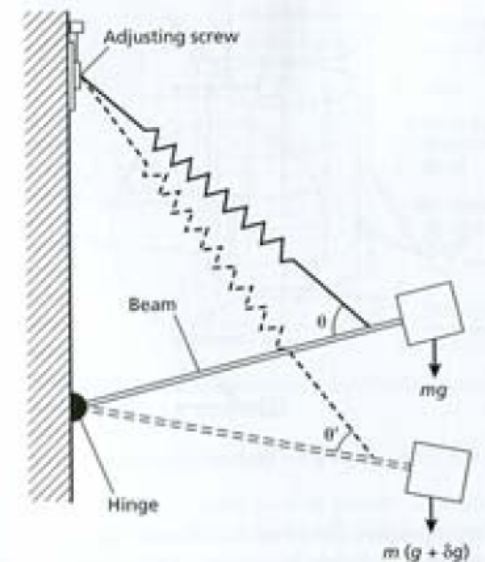


Fig. 6.2 Principle of the LaConte and Romberg gravimeter.

Los materiales de los resortes deben tener un módulo de elasticidad E elevado, pequeños coeficientes termo-elástico y de dilatación térmica; pequeña histéresis elástica y pequeña influencia magnética y eléctrica. Para asegurar precisiones aceptables en las mediciones debe aislarse a los sistemas elásticos de: *variaciones de presión* (construcción al vacío), *variación de temperatura* (termostatación o termocompensación), *golpes*, *vibraciones*, *campos magnéticos y eléctricos*, etc.

Otro aspecto a tener en cuenta en los gravímetros es el dispositivo de nivelación ya que se requiere alinear el sistema de medición con la línea de la plomada (el vector g es vertical).

Gravímetros inestables

Los cambios de temperatura afectan sensiblemente el largo del resorte, por lo cual estos gravímetros incluyen un **termostato que mantiene constante la temperatura interna**.

El gravímetro debe estar **alineado con la vertical por lo cual incluyen un nivel**.



- **Miden con una precisión de 0.01 mGal en un rango de 5000 mGal.**

Gravímetro La Coste and Romberg

Lucien La Coste (1934) ideó un sismógrafo vertical de periodo largo que abrió un nuevo camino para la construcción de gravímetros.

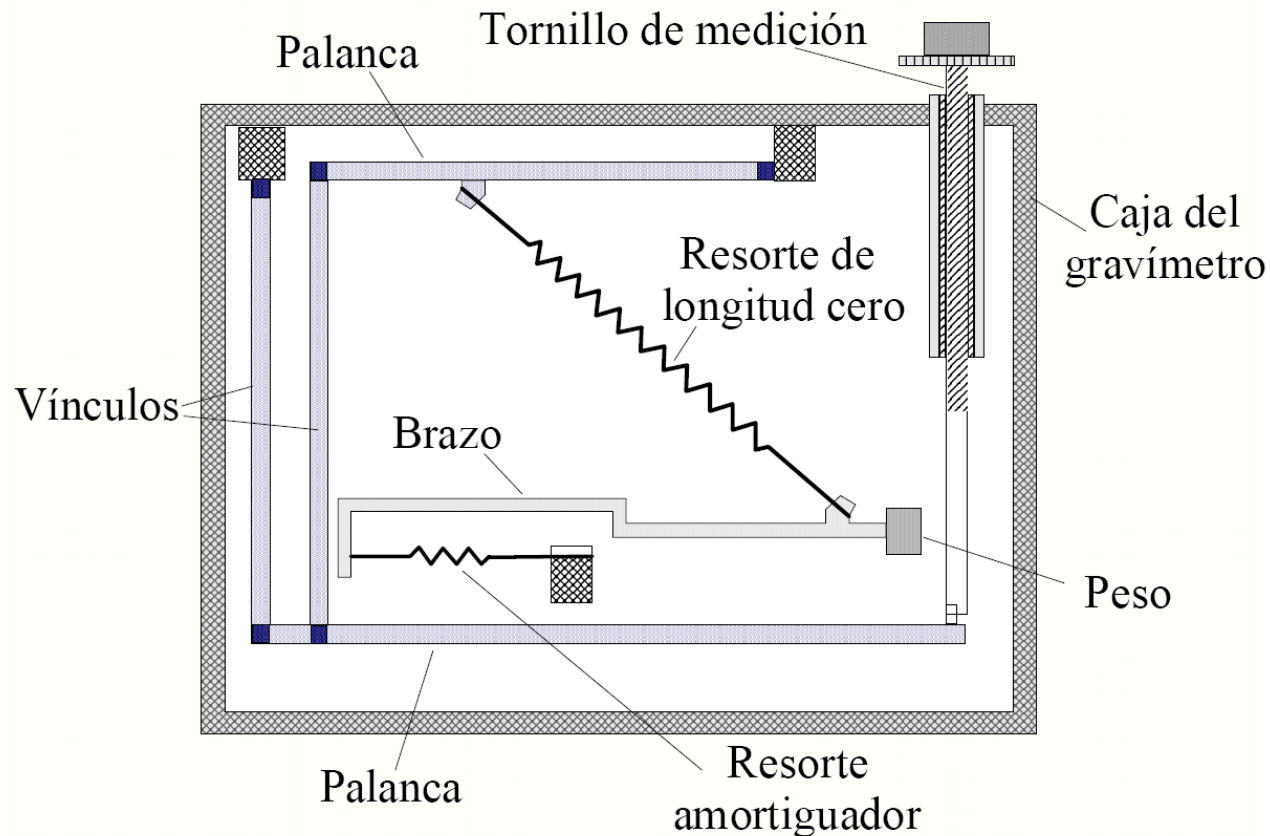


Figura III.9: Esquema de funcionamiento del gravímetro La Coste – Romberg.

Un peso en el extremo de un brazo horizontal es soportado por un resorte de longitud cero (sistema no lineal). La diferencia de gravedad Δg entre dos estaciones es proporcional a la diferencia de giros y fracción de giros necesaria para llevar en cada estación a la masa (o peso) a su posición cero (nula).

Por casi 40 años los gravímetros La Coste & Romberg han sido los equipos de mayor difusión en geofísica por su precisión (± 0.01 mGal), rango de lectura (7000 mGal), velocidad de lectura (2 o 3 min) y ligereza (5 kg).

En la foto se muestra el nuevo gravímetro La Coste & Romberg provisto con sistema electrónico lineal de haz nulo "Aliod 100". Tiene un rango de 100 mGal con una resolución de 0.01 a 0.001 mGal. No requiere de un operador entrenado para producir lecturas en el tradicional sistema óptico-mecánico, solo se nivela el equipo y libera el sistema electrónico y se obtienen lecturas digitales de g en mGal. Mediante software incorporado a un dispositivo PalmTM provee las lecturas corregidas por marea luni-solar.



Sistemas Electrónicos Feedback

Debido a su pequeño tamaño pueden incorporarse circuitos feedback en los gravímetros combinándolos con circuitos capacitivos.

La fuerza gravitacional sobre una masa de prueba es balanceada por un resorte y por una pequeña fuerza electrostática de restauración. Un cambio de “g” altera la posición de la masa que se traduce en un desplazamiento capacitivo. Un circuito automático de feedback (realimentación negativa) aplica una corriente continua a las placas del capacitor y produce una fuerza electrostática que lleva a la masa a su posición nula. El voltaje “feedback” es una medida del valor relativo de g. Este voltaje en el sitio de medición es convertido en una señal digital y luego enviado al sector de adquisición de datos para procesamiento; exhibición y almacenamiento.

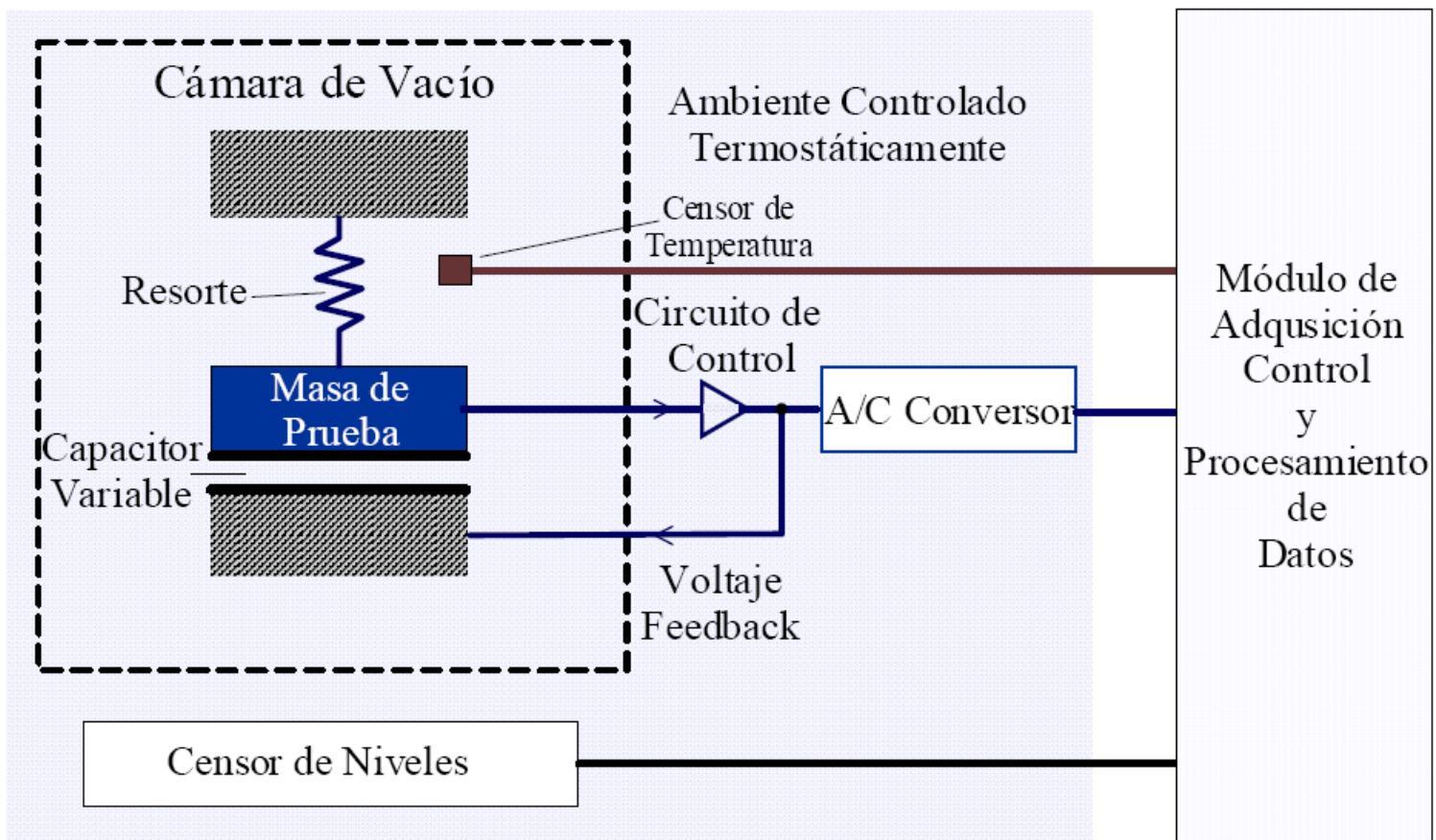


Figura III.11: Esquema de funcionamiento de un gravímetro electrónico automatizado mediante circuito feedback.

Gravímetro Scintrex Autograv CG-3

Forma parte de la generación de gravímetros automáticos. Este autogravímetro tiene un rango de lectura directo de 7000 mGal; una resolución de 0.01 mGal; elimina el error del operador realizando lecturas automáticas que son corregidas por mareas terrestres, variaciones de temperatura y defectos de nivelación, y almacena resultados en memoria electrónica.

Teoría De Operación

El elemento sensible del Autograv está basado en un sistema elástico de cuarzo fundido. La fuerza gravitacional en la masa de prueba es balanceada por un resorte y una pequeña fuerza electrostática de restauración. Cuando la posición de la masa, censada por un desplazamiento capacitivo transductor, es alterada por un cambio de gravedad, automáticamente un circuito feedback aplica un voltaje en corriente continua a las placas del capacitor produciendo una fuerza electrostática en la masa que es llevada a su posición de equilibrio. El voltaje feedback, que es una medida del valor relativo de gravedad en el sitio de lectura, es convertido a señal digital y luego transmitida al sistema de adquisición, procesamiento, almacenamiento y exhibición de datos del instrumento.

Es un sistema compacto. Las propiedades elásticas del resorte junto con los límites de oscilación de la masa de prueba permiten operar al instrumento sin fijación.



Figura III.12: Foto de un gravímetro Scintrex Autograv CG-3.

Los sensores de nivelación son electrónicos, con resolución de 1 segundo de arco. La salida de los sensores son mostradas en la consola y transmitidas al sistema de adquisición y procesamiento de datos. Si el instrumento es operado en una base inestable se pueden hacer correcciones automáticas en tiempo real de nivelación sobre un rango de ± 200 segundos de arco.

La protección por variaciones de temperatura ambiental es provisto colocando: el sistema elástico, el convertidor digital, componentes electrónicos sensibles y sensores de nivelación dentro de un ambiente de gran estabilidad, doble fase, termostáticamente controlado. No hay compensaciones mecánicas de temperatura. Los cambios externos de temperatura son reducidos en un factor de 10^5 y los pequeños efectos residuales son corregidos por el software usando la salida del sensor en contacto con el resorte principal. El rango de operación del termostato es -40°C a 45°C .

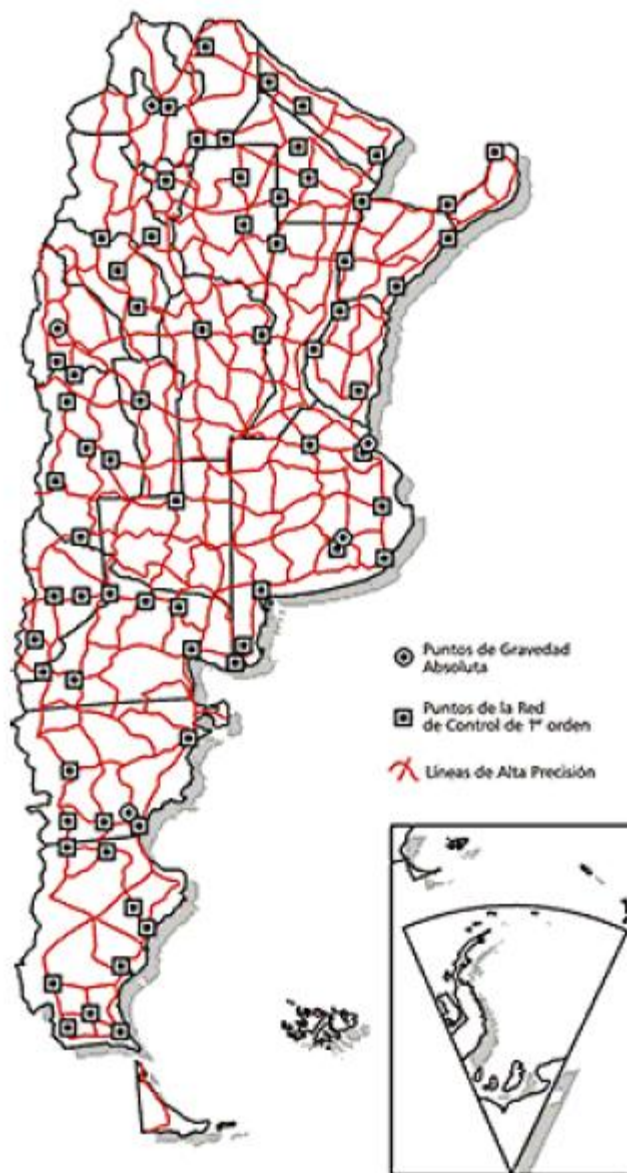
Todo el mecanismo sensible está encerrado en una cámara de vacío que le da muy buen aislamiento de las presiones atmosféricas. El ambiente estable de operación da al sistema elástico una deriva de largo término predicha con precisión, produciendo correcciones en tiempo real por medio del software, estas son menores que 0.02 mGal/día .

Relevamientos Terrestres

- Incluir estación con g absoluta conocida
- El espaciado entre estaciones debe ser coherente con la escala de la anomalía
- Todos los puntos del relevamiento deben tener la posición planialtimétrica determinada (X , Y , Z). Las cotas (Z) deberán asegurarse a los 3 metros si se trabaja al mGal, a los 30 cm para 0.1 mGal, 3 cm para 0.01 mGal. Y con error menor a 12 m para el centésimo de mGal.
- Repetir medición en base cada 2 horas ideal.



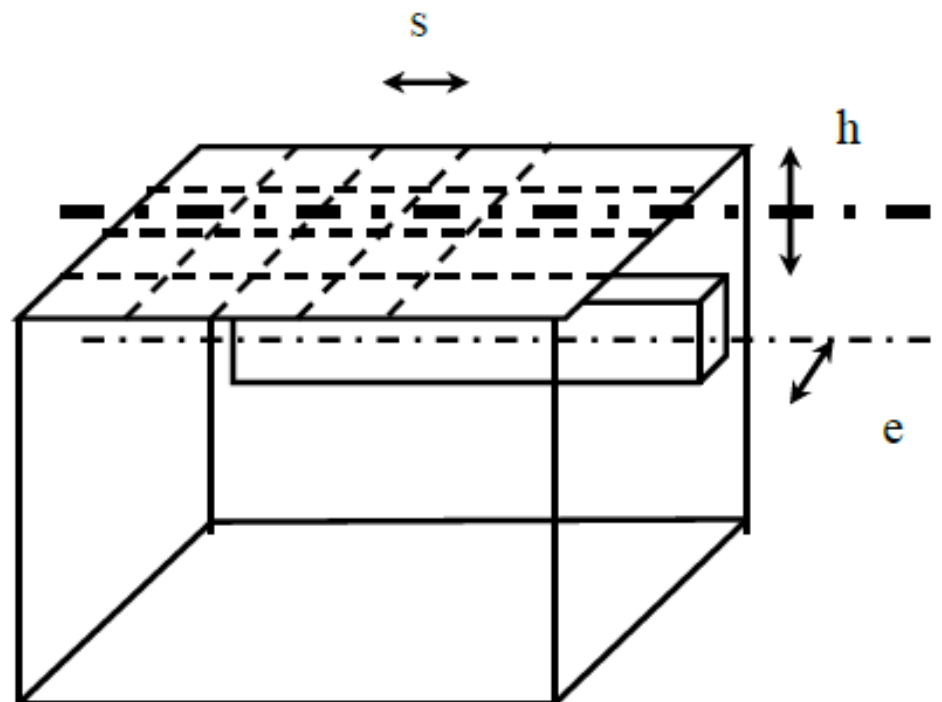
Red Gravimétrica

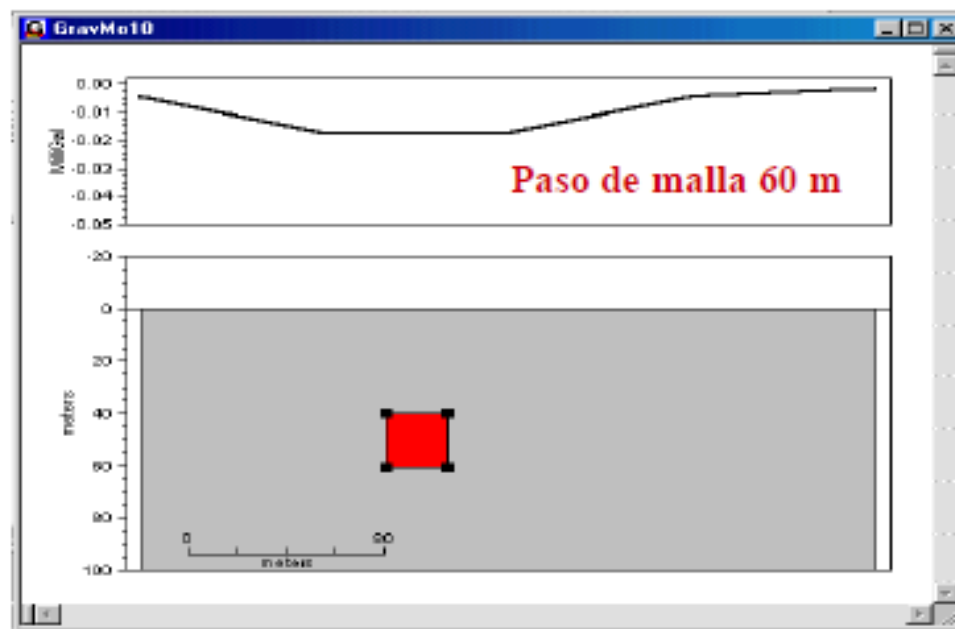
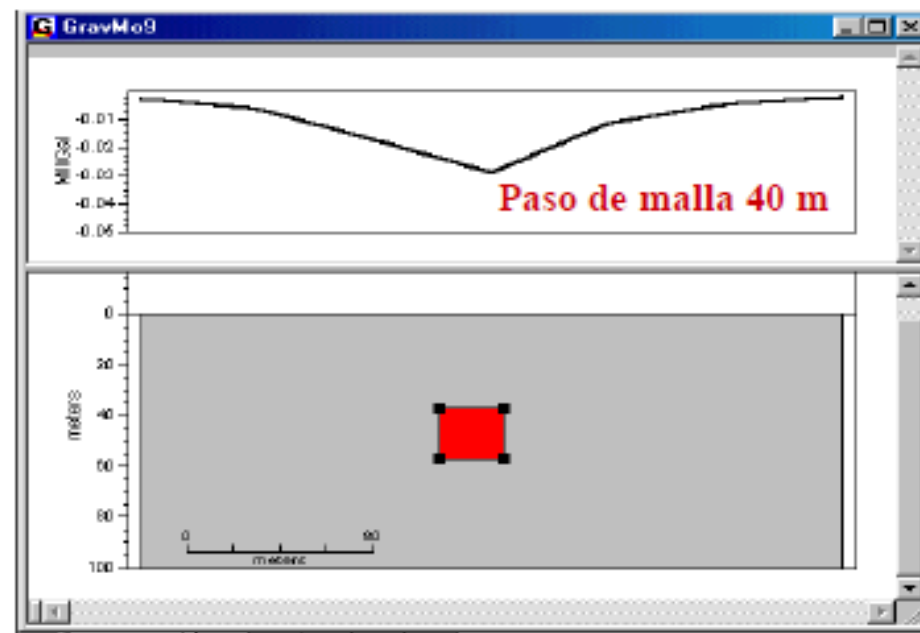
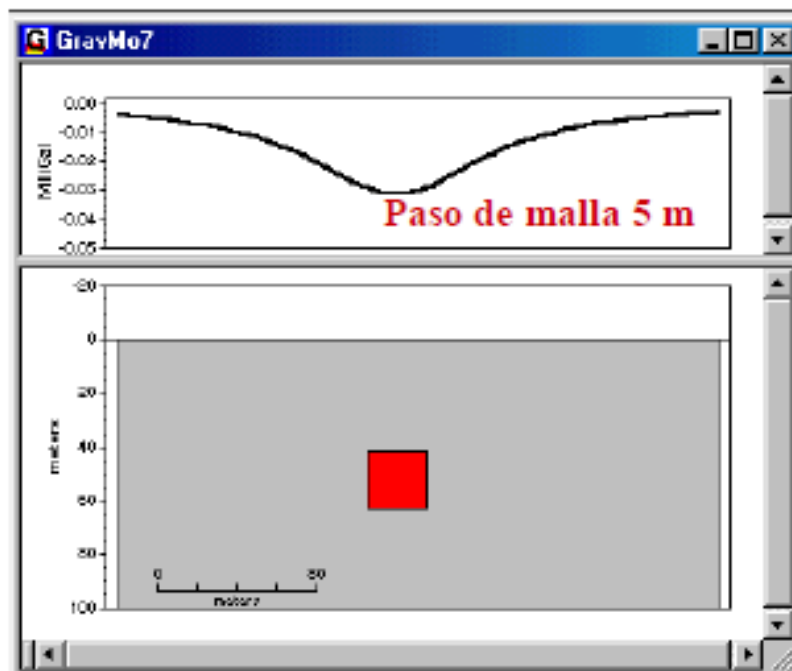


f (disposición de la masa anómala)

$$s < h$$

$$s < e/3$$





Método del rulo

Admitiremos que la deriva es lenta y regular y por tanto puede ser considerada como lineal en cortos intervalos de tiempo (dos horas como máximo). Para realizar la corrección es entonces necesario regresar a la estación de control dentro del plazo en el cual se admite variación lineal (2 horas).

Uno de los métodos de medición más generalizado para eliminar este efecto es el *método del rulo*. Este se emplea en determinaciones precisas de gravedad. Si se desea medir los valores de gravedad en las estaciones: A, B, C,, etc. Se procede como muestra la figura:

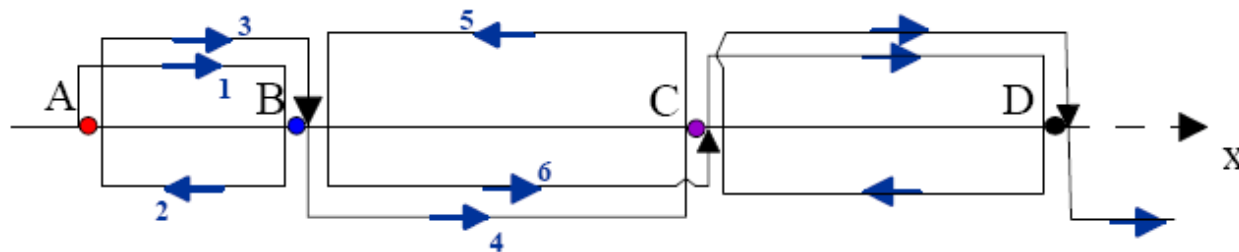


Figura III.15: Esquema de avance de las mediciones por el método del rulo.

Se mide el valor de g en la estación A (L_A) en el tiempo t_A , luego se lee el valor de la gravedad en la estación B (L_B) en el tiempo t_B , a continuación se repite la medición en A L'_A en el tiempo t'_A y el valor de L'_B en t'_B para recién entonces avanzar a la estación C, repitiéndose el mismo procedimiento (B-C-B-C-D..., Figura III.15). De esta manera se tiene en un diagrama lecturas relativas versus tiempos (Figura III.16):

Método del rulo

Conocido el valor de la gravedad en la estación A (g_A) el valor de la gravedad en B se obtiene transportando el valor de la gravedad, es decir:

$$g_B = g_A + \Delta g_{B-A} \quad (\text{III.10})$$

Donde, por el método del rulo, Δg_{B-A} se obtiene interpolando el valor de una lectura al instante de medición de la otra:

$$\Delta g_{B-A} l = L_B - (L_A + Cl) \quad (\text{III.11})$$

Método del rulo

$$C1 = \frac{(L_{A'} - L_A)}{(t_{A'} - t_A)} (t_B - t_A) \quad (\text{III.12})$$

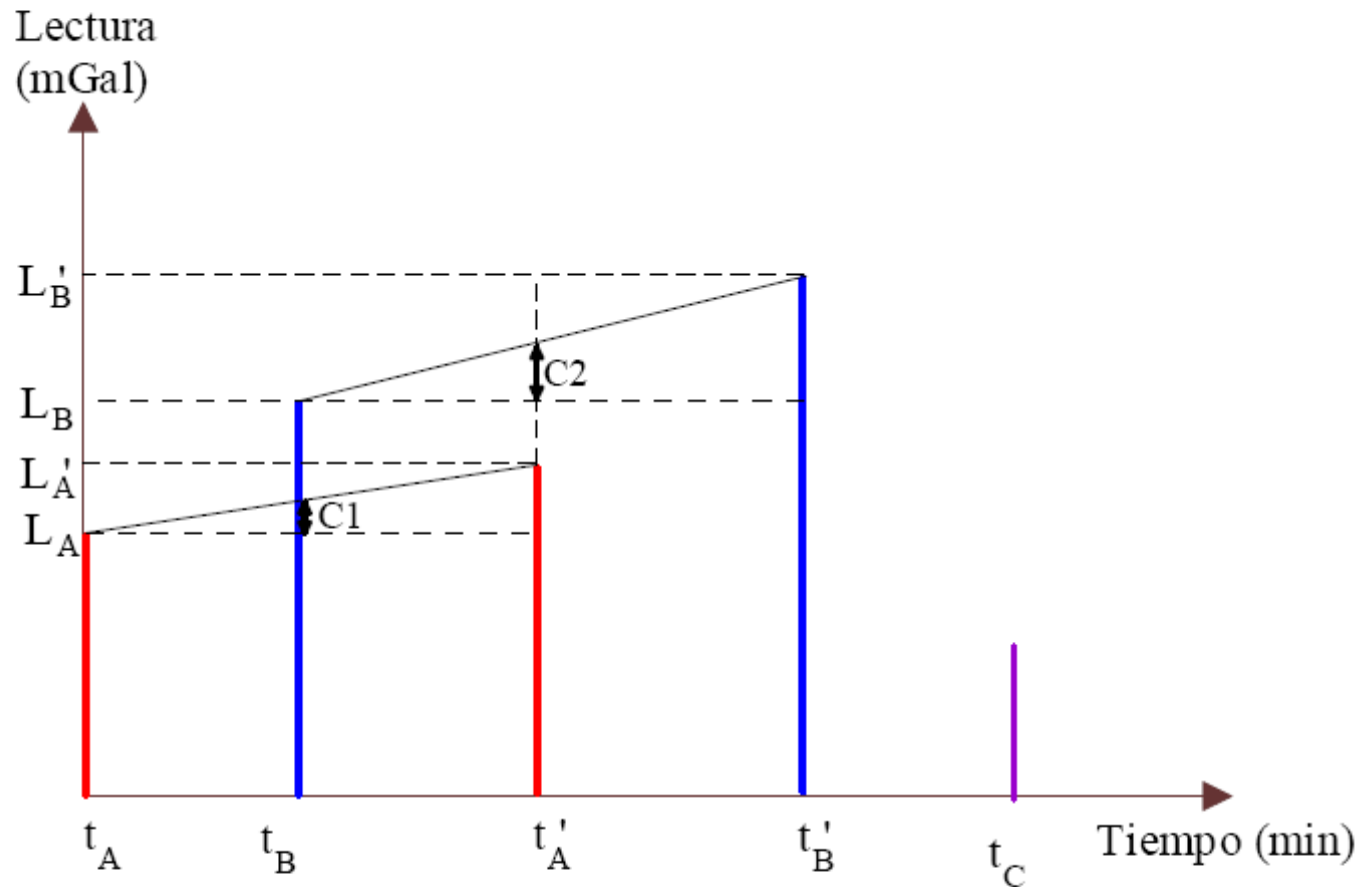


Figura III.16: Diagrama lecturas relativas versus tiempos por el método del rulo.

Método del rulo

Además podemos llevar L_B al tiempo de L_A mediante la corrección C_2 :

$$\Delta g_{B-A2} = (L_B + C_2) - L_A' \quad (\text{III.13})$$

$$C_2 = \frac{(L_B' - L_B)}{(t_B' - t_B)} (t_A' - t_B) \quad (\text{III.14})$$

Finalmente, por el método del rulo, la diferencia de gravedad entre la estación A y B será el promedio de Δg_{B-A1} y Δg_{B-A2} :

$$\Delta g_{B-A} = (\Delta g_{B-A1} + \Delta g_{B-A2}) / 2 \quad (\text{III.15})$$

Se podrán promediar tantos Δg_{B-A} como repeticiones del rulo se efectúen.

El método del rulo simple economiza tiempo obteniendo un control de deriva por estación (una repetición por estación: A-B-A-C-B-D-C-E ...), ver Figura III.17.

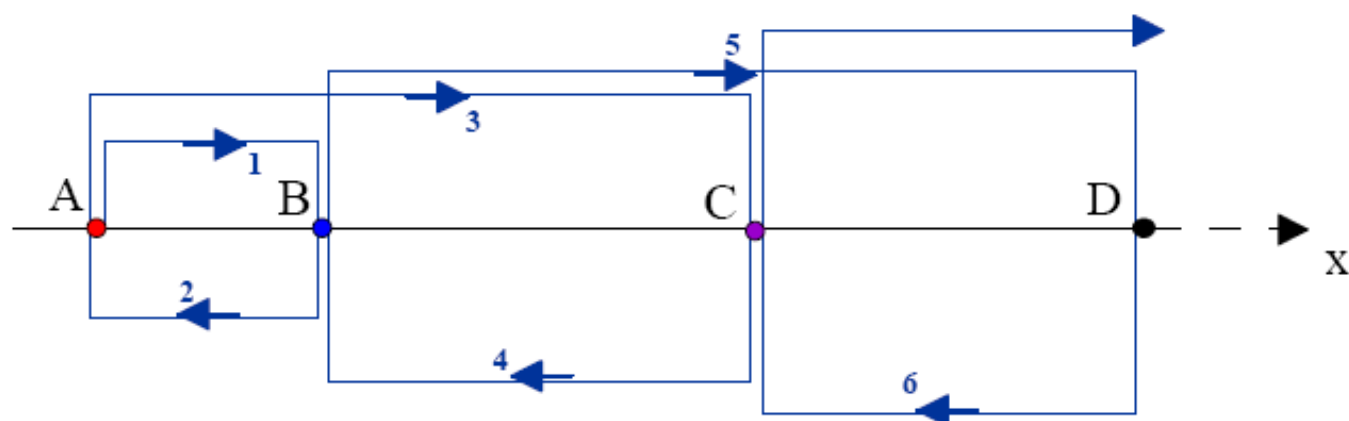


Figura III.17: Esquema de avance de las mediciones por el método del rulo simple.

De esta manera se transporta la gravedad a las estaciones B, C, D, ..., mediante las expresiones (III.10), (III.11) y (III.12).

Puede suceder que las precisiones deseadas no hagan necesario el empleo del rulo doble o simple, o que dentro de las 2 horas en que consideramos lineal la deriva instrumental se puedan realizar varias mediciones:

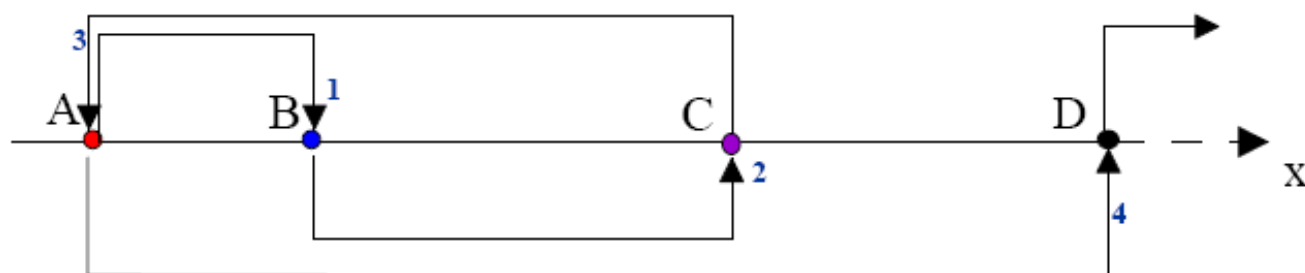


Figura III.18: Esquema de avance de las mediciones con repeticiones en una estación base.

Donde:

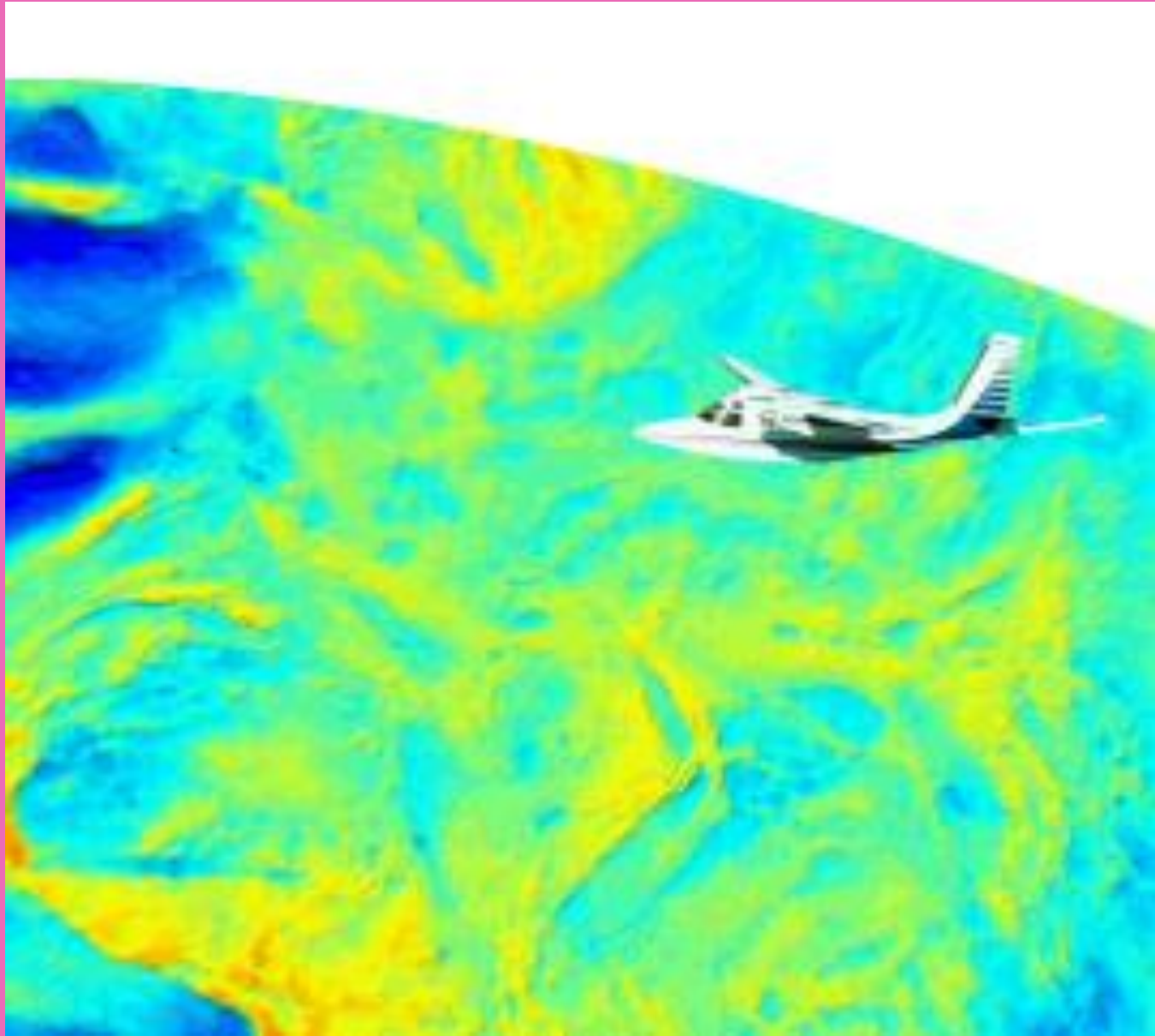
$$C_{BA} = \frac{(LA' - LA)}{(tA' - tA)}(tB - tA), \quad C_{CA} = \frac{(LA' - LA)}{(tA' - tA)}(tC - tA), \text{ etc.}$$

LaCoste & Romberg para mediciones en altamar

- Inevitablemente **miden con menor precisión (alrededor de 1 mGal)** debido a severas aceleraciones verticales y horizontales

- **Aceleraciones horizontales** debidas a oleaje, movimiento del barco en el eje vertical, cambios de velocidad, son en gran medida eliminados montando al gravímetro en un estabilizador (giróscopo)

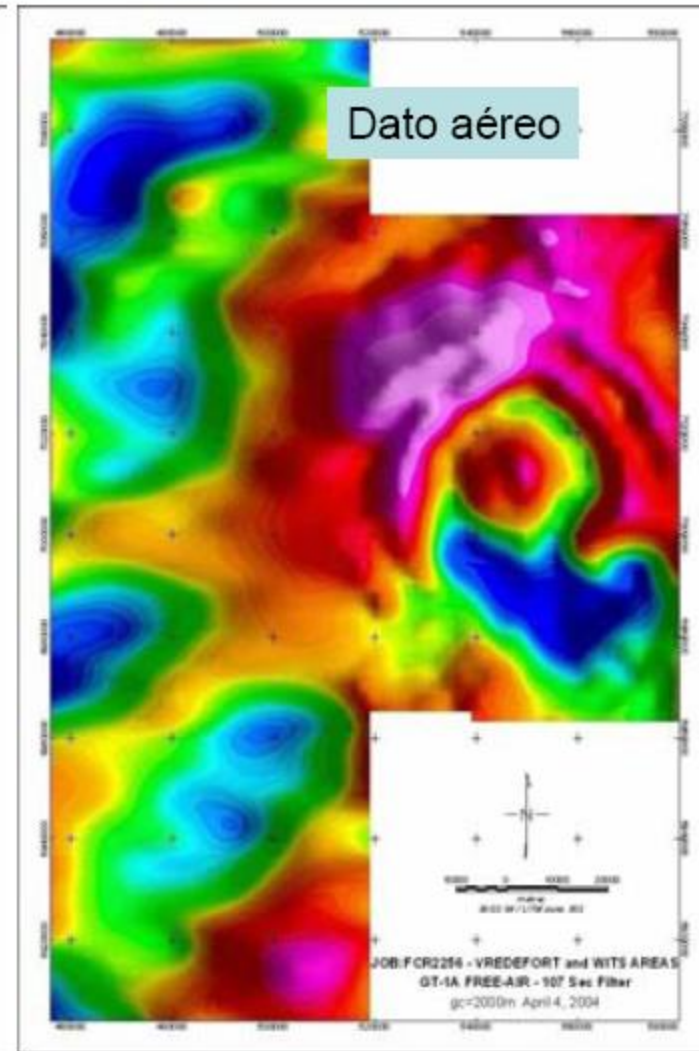
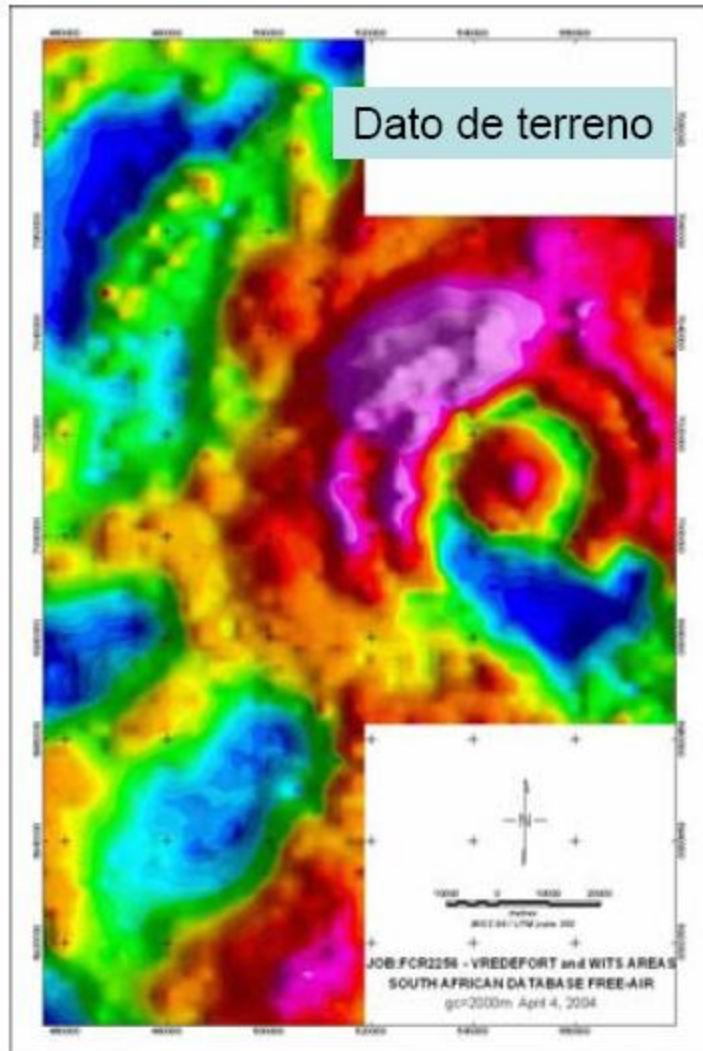
- Las variaciones de gravedad por movimientos verticales debidos al oleaje pueden ser canceladas promediando lecturas en un período mayor al de movimiento de las olas.



Precisión y Resolución de la Gravimetría y Magnetometría Aéreas

- En aerogravimetría las precisiones terrestres no se alcanzan debido a que no se puede distinguir entre **aceleración inercial** (aeronave) de los **cambios de g**, por debajo de 1 a 10 mGal.
- Estas limitaciones se deben a la resolución del **método GPS**, a **deficiencias en las plataformas estabilizadoras** y a falta de **resolución de los gravímetros aerotransportados**.
- Los métodos magnetométricos aéreos tienen precisiones semejantes a los terrestres.

Comparación de datos Gravimétricos Aéreos Vs. Terrestres



El movimiento del gravímetro hace que la aceleración centrífuga y por lo tanto la atracción gravitatoria varíe. Esta variación está relacionada linealmente con la componente E-O de la velocidad del gravímetro. La corrección de este efecto debe su nombre al geofísico húngaro R. Eötvös y es positiva cuando el gravímetro se mueve hacia el O y negativa cuando se mueve hacia el E.

METODO GRAVIMETRICO: REDUCCION DE DATOS

Plataformas en Movimiento ($V > 0$) – Corrección de Eötvös

$$g_E = 7.503 V \cos(\phi) \sin(\alpha) + 0.004154 V^2 \text{ [mGal]}$$

V [nudos] ; ϕ =latitud ; α =rumbo c/r norte verdadero

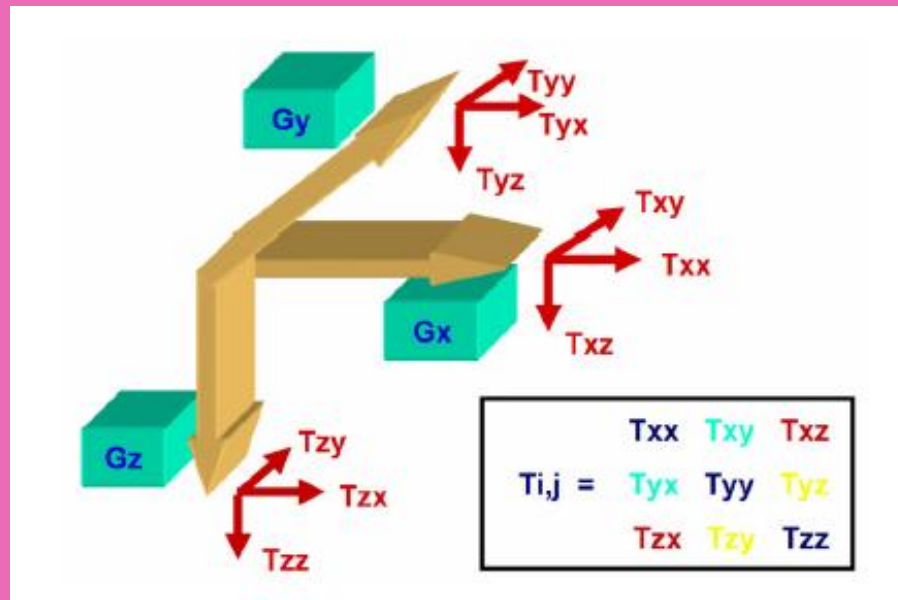
Puede tener magnitud del orden de efectos asociados a fenómenos geológicos (~ 5 mGal para un barco moviéndose hacia el Este, en latitud 45° y con $V= 1$ nudo).

Crítico para levantamientos aerotransportados.

Gradiometría de gravedad aerotransportada (AGG)

- Unidad de gradiente de g con la distancia: Eötvös (E)
- Donde $1 \text{ E} = 0,1 \text{ mGal/km}$
- O $1 \text{ E} = 10^{-7} \text{ Gal/m}$
- En la superficie terrestre, el gradiente máximo se produce en la componente vertical y es de aprox. 3000 E.

- El campo gravitatorio es un vector y puede ser descompuesto en tres componentes mutuamente perpendiculares.
- Los métodos convencionales miden la componente vertical (G_z).
- La gradiometría de gravedad mide las variaciones espaciales (gradientes) del campo gravitatorio.
- Cada una de las 3 componentes posee un gradiente paralelo a cada uno de los ejes de coordenadas.
- Air-FTG™ es una tecnología de plataformas móviles con acelerómetros múltiples que mide el tensor de gravedad completo.
- Espaciado líneas de vuelo: detallado 50 m, regional 2000 m.



- El Air-FTG contiene tres instrumentos de medición de Gradiente de la Gravedad (GGIs), cada uno con dos pares opuestos de acelerómetros montados en un disco.

Instrumento de medición de gradiente de gravedad, incorporado en una plataforma estabilizada inercialmente

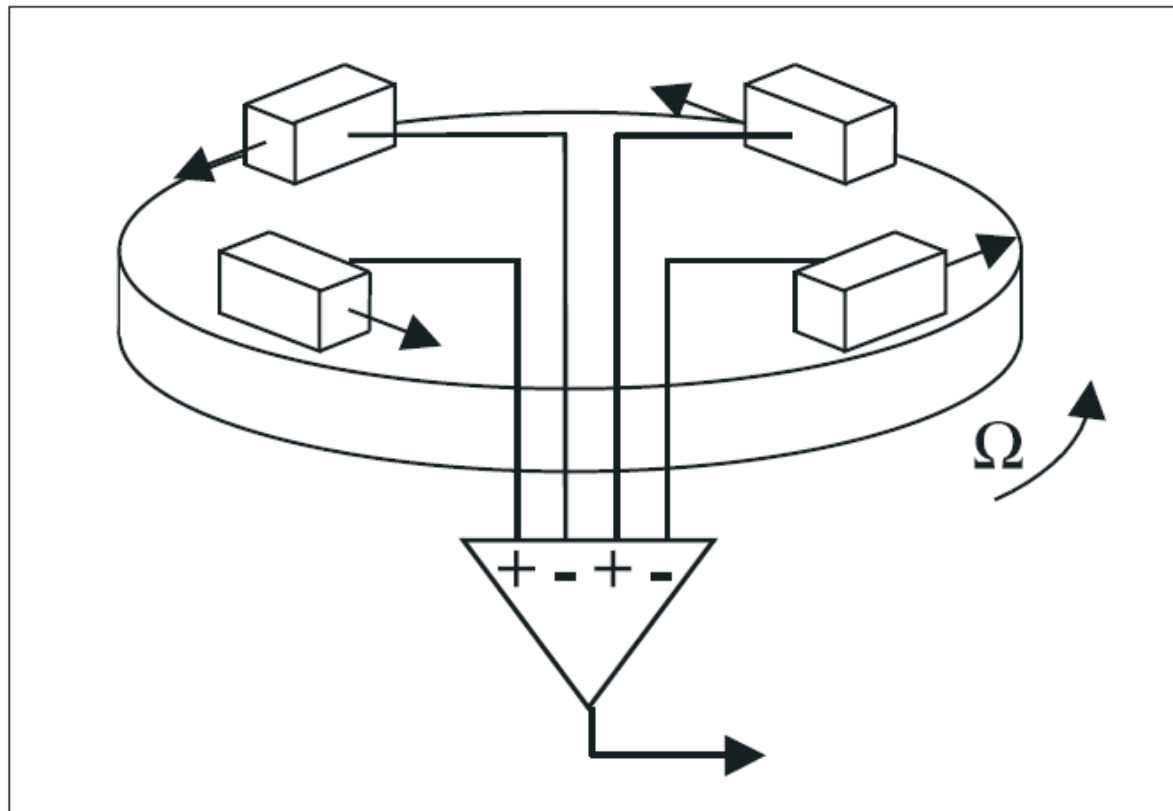
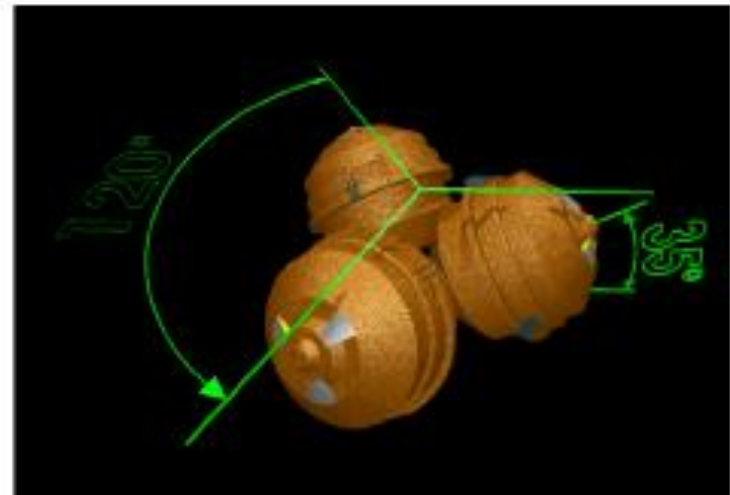


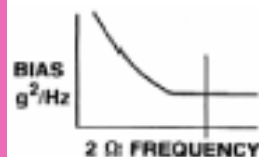
Fig. 1 Schematic diagram of the gravity gradient instrument (after Metzger, 1977). The sensitive axes of the accelerometers are indicated by arrows.

- El Air-FTG contiene tres instrumentos de medición de Gradiente de la Gravedad (GGIs), cada uno con dos pares opuestos de acelerómetros montados en un disco.
- Los tres GGIs están montados con sus ejes mutuamente perpendiculares y con el mismo ángulo con la vertical.

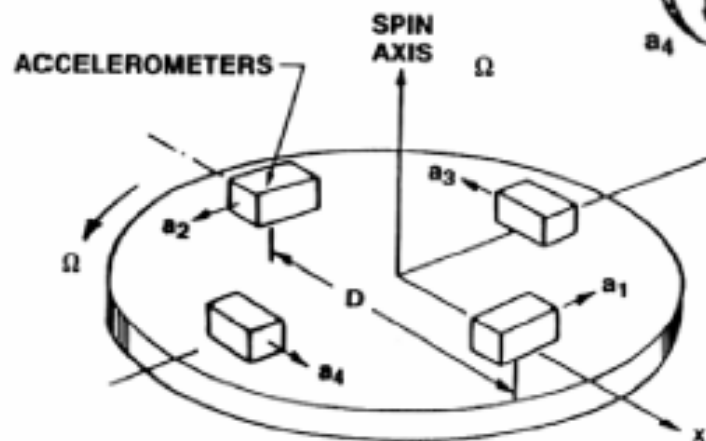


Gradiómetros en aerogravimetría

- 2 pares opuestos de acelerómetros en un disco
- El gradiente de gravedad es medido como la **diferencia en lectura** entre los pares opuestos de acelerómetros en cada disco
- Para minimizar aceleraciones del instrumento se rota el dispositivo



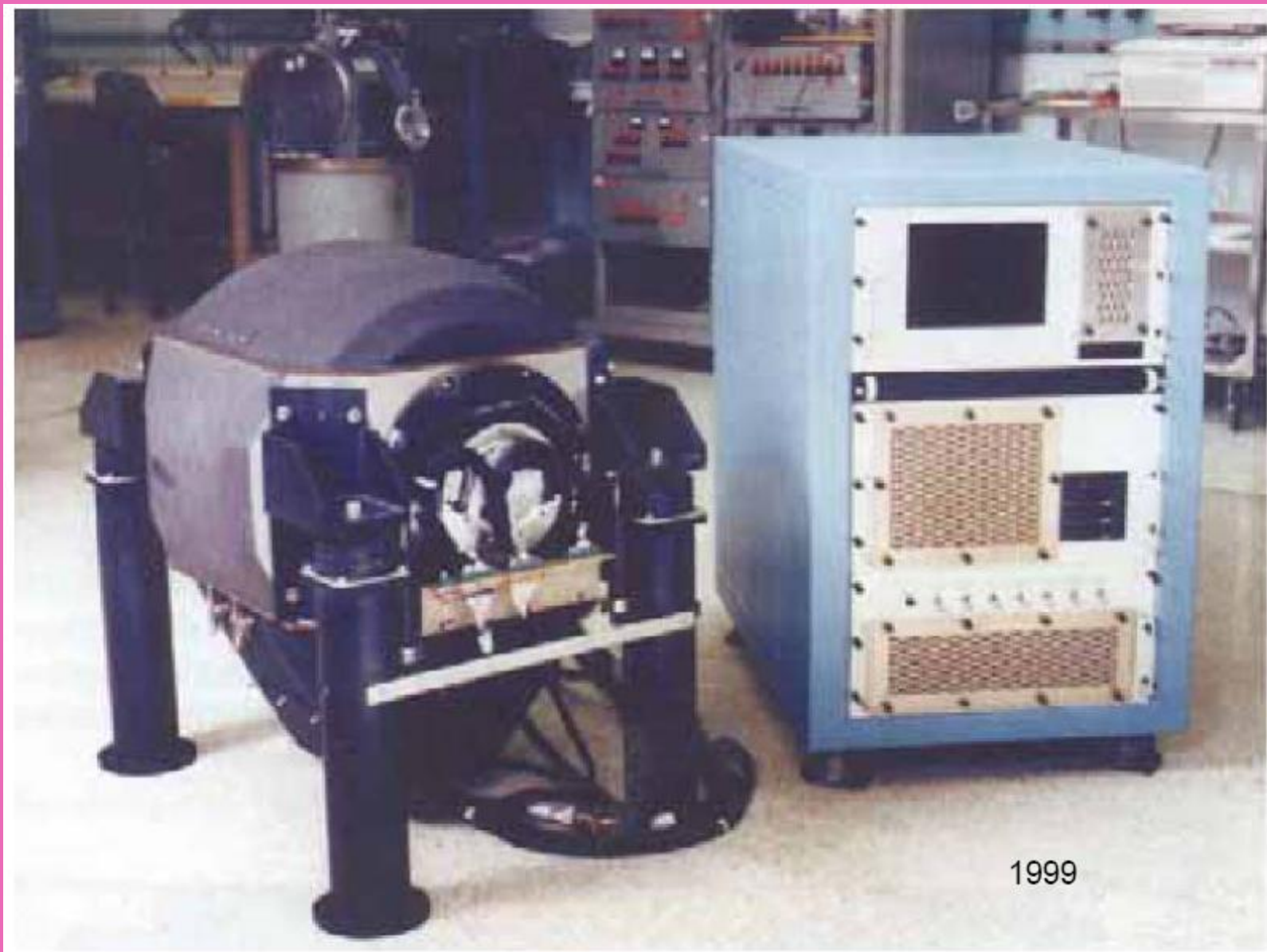
$$(a_1 + a_2) - (a_3 + a_4) = D(T_{yy} - T_{zz}) \sin 2\Omega t + 2D(T_{yz}) \cos 2\Omega t$$



$$(a_1 + a_2) - (a_3 + a_4) = D(T_{xx} - T_{yy}) \sin 2\Omega t + 2D(T_{xy}) \cos 2\Omega t$$

Gradiómetro de gravedad aerotransportado
AGG (airborne gravity gradiometer)

- Desarrollado por BHP Billiton
- Nombre comercial Falcon
- Montado en aviones Cessna, pueden relevarse junto con otros métodos aéreos
- Alturas típicas de relevamiento 100-120 m,
- Nivel base de detección originalmente de 0,2 mGal y 5-8 Eo, reducido a 2 Eo en la actualidad.



1999



Lockheed Martin Full Tensor Gradiometer - FTG

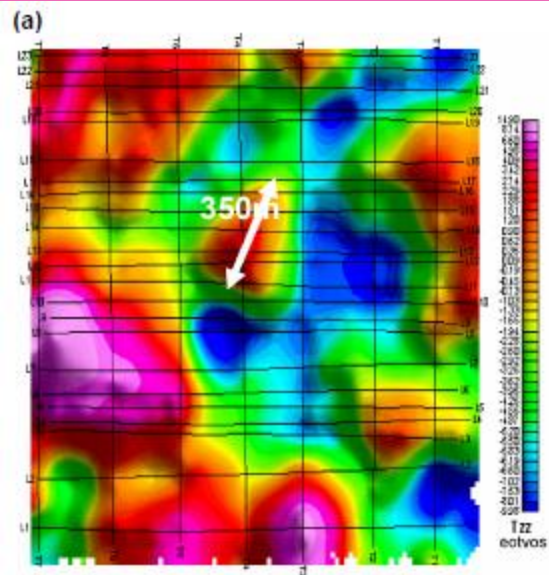


Exploration Gravity Gradiometer - EGG

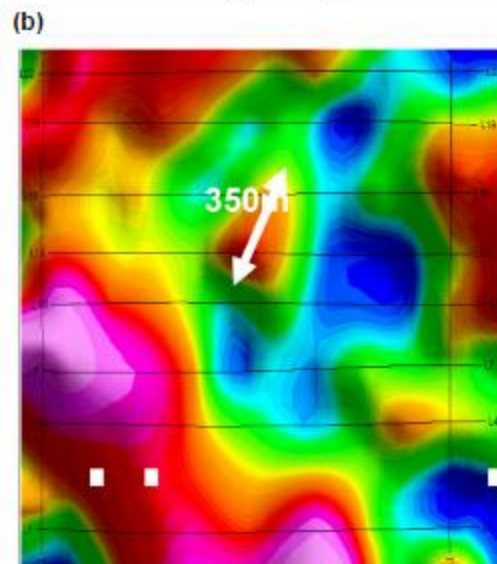
Sensibilidad aumentada usando superconductores a temperaturas criogénicas



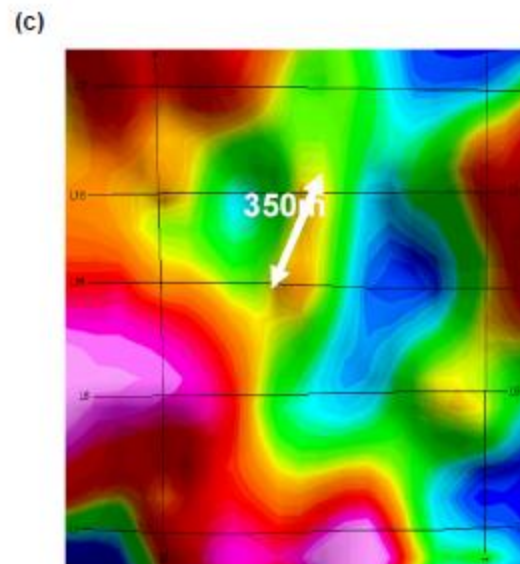




Inline spacing 50 m



Inline spacing 150 m



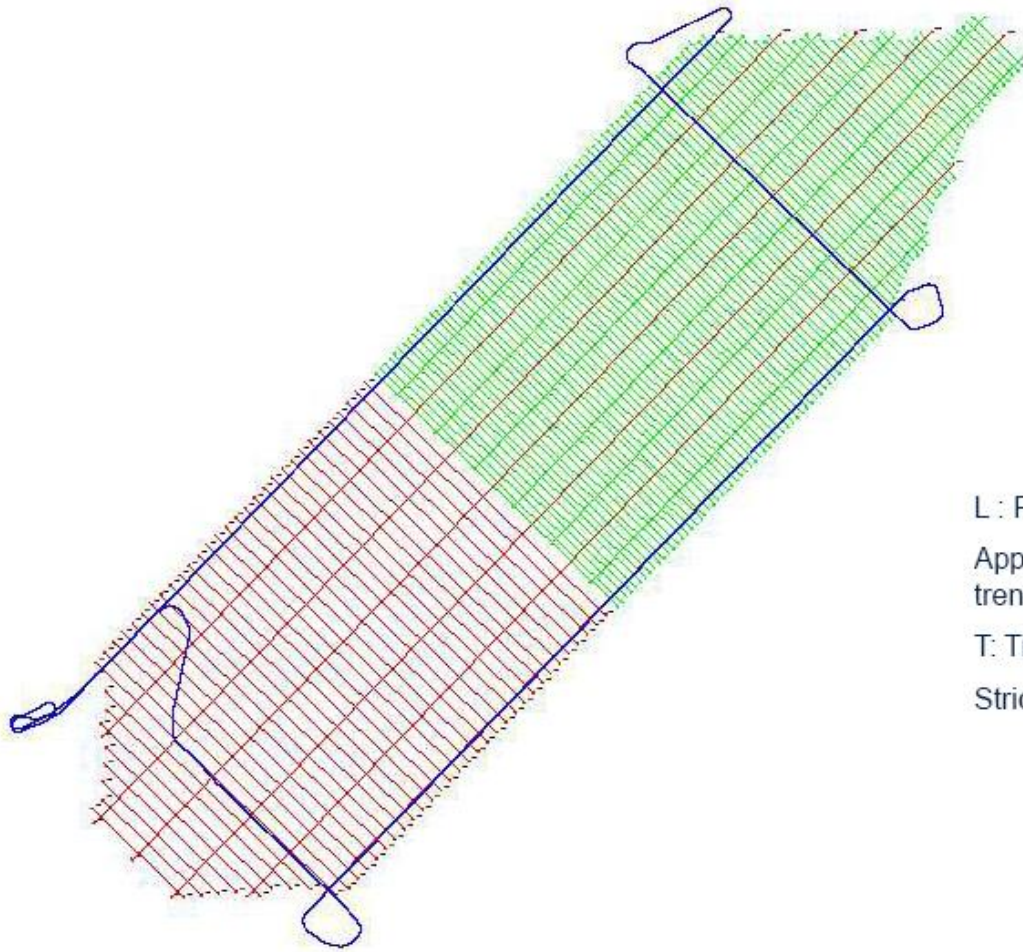
Inline spacing 250 m

Figure 5. Images illustrating line spacing issues. A survey flown with 50 m lines spacing shown in (a) was reprocessed for line spacing of 150 m (b) and 250 m (c). The central 350 m wide target is resolved best with 50 to 150 m line spacings.

Gradiómetro de gravedad aerotransportado
AGG (airborne gravity gradiometer)

- Actualmente en helicóptero puede volarse a 50 m de altura
- Nivel base de detección originalmente de 0,2 mGal y 5-8 Eo, reducido a 2/3 Eo en avión/helicóptero respectivamente.

Gravimetría aérea



L : Flight or production lines

Approximately perpendicular to the main trend of the known structures

T: Tie or control lines

Strictly perpendicular to the Flight Lines

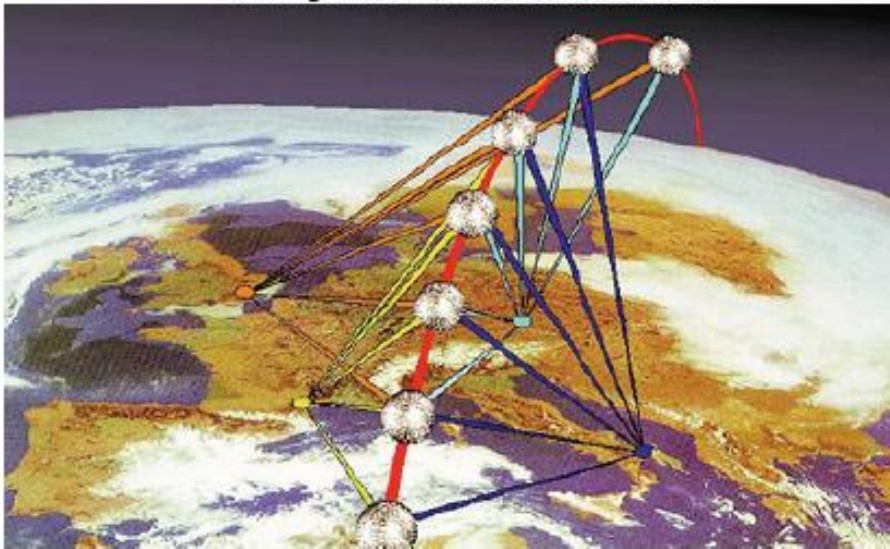
Variaciones en el campo gravitatorio, en función de variaciones en la órbita de satélites

La órbita de los satélites artificiales es perturbada por variaciones en el campo gravitatorio

Por lo cual su medición precisa permitirá detectar variaciones temporales en el campo gravitatorio

- Satellite trajectory derived from Satellite Laser Ranging (SLR)

Tracking a satellite with a network of SLR stations

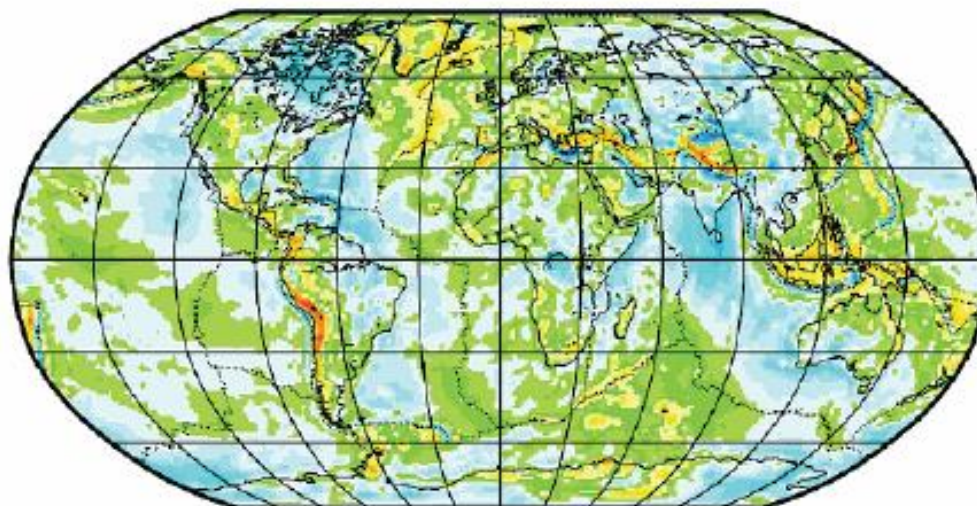


SLR at the Goddard Geophysical and Astronomical Observatory. The two laser beams are coming from the network standard SLR station, MOBILAS-7 (MOBILE LASer) and the smaller TLRS-3 (Transportable Laser Ranging System) during a collocation exercise.



Determinación del campo gravitatorio desde el espacio

GRIM5: versión del campo gravitatorio, tomado con 21 satélites desde 1971 (**precisión 3 mGal**)



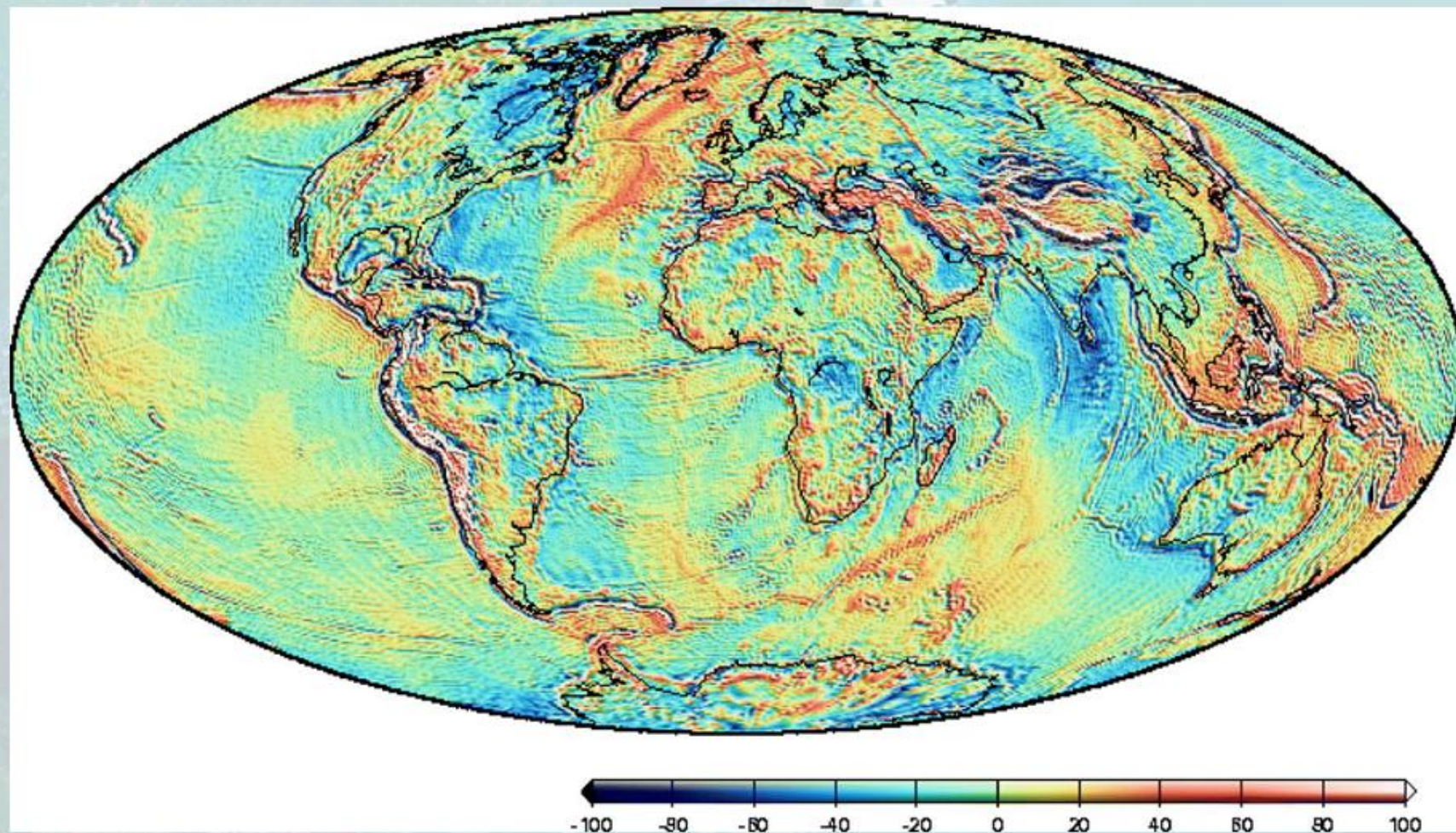
GRIM5-C1 Gravity Anomalies ($a=6378136.46\text{m}$, $1/f=298.25765$) in mgal



1999

15 YEARS OF PROGRESS IN RADAR ALTIMETRY

EIGEN-CG03C Gravity Anomalies



Venice (Italy), 13 > 18 March 2006

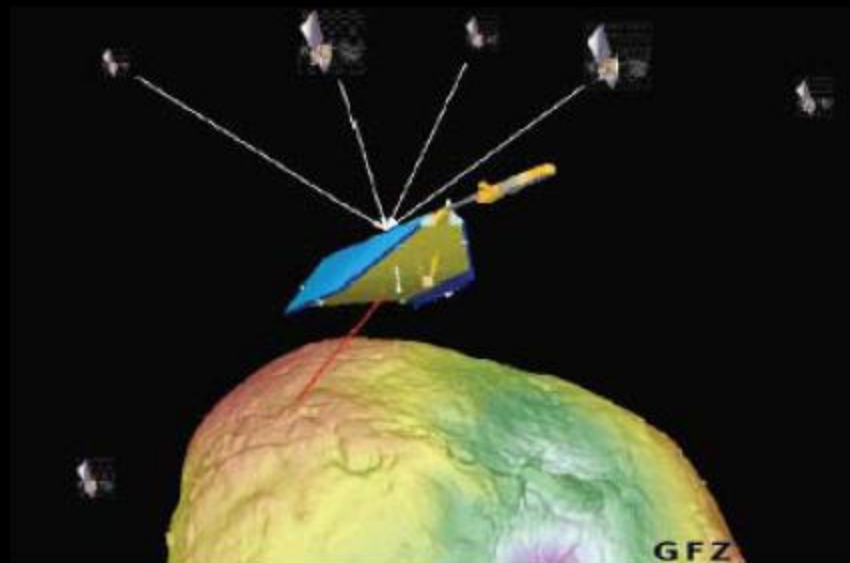
2004-2006

Determinación del campo gravitatorio desde el espacio

- Mucha menor precisión
- Pero relevamiento continuo
- Y en áreas de difícil a nulo acceso como hielos polares

Otras misiones....

CHAMP: Challenging Minisatellite Payload
(alemán; GFZ Potsdam): pequeña misión desde julio 2000
Baja altitud, cerca de la órbita polar

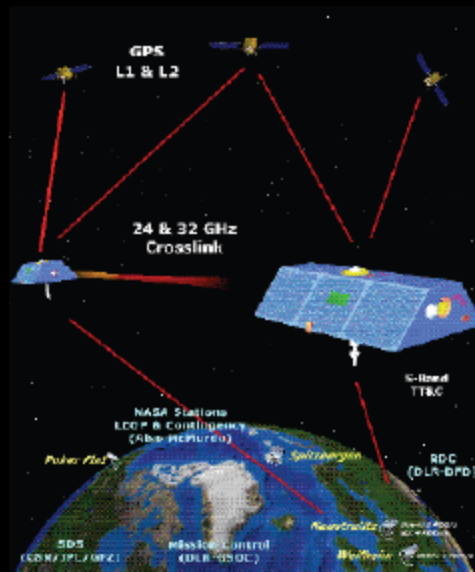


Otras misiones....

GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment

NASA/DLR, despegó en marzo de 2002

Dos satélites que vuelan a 220 km una de otra en una órbita polar
unos 500 km sobre la Tierra



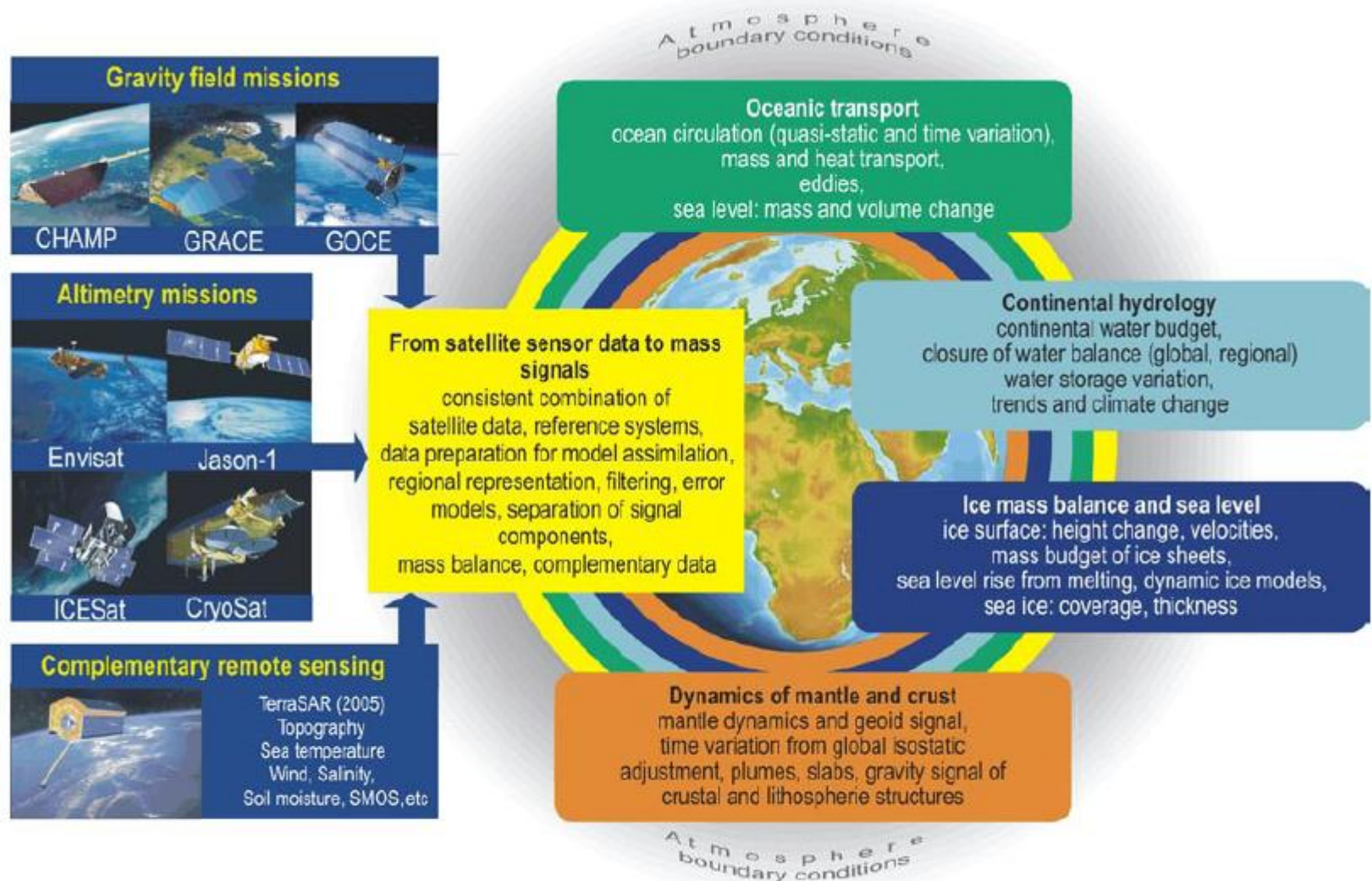


Figure 1.2: *Exploitation of satellite gravity and altimeter mission products to determine mass transport and mass distribution in a multi-disciplinary environment.*

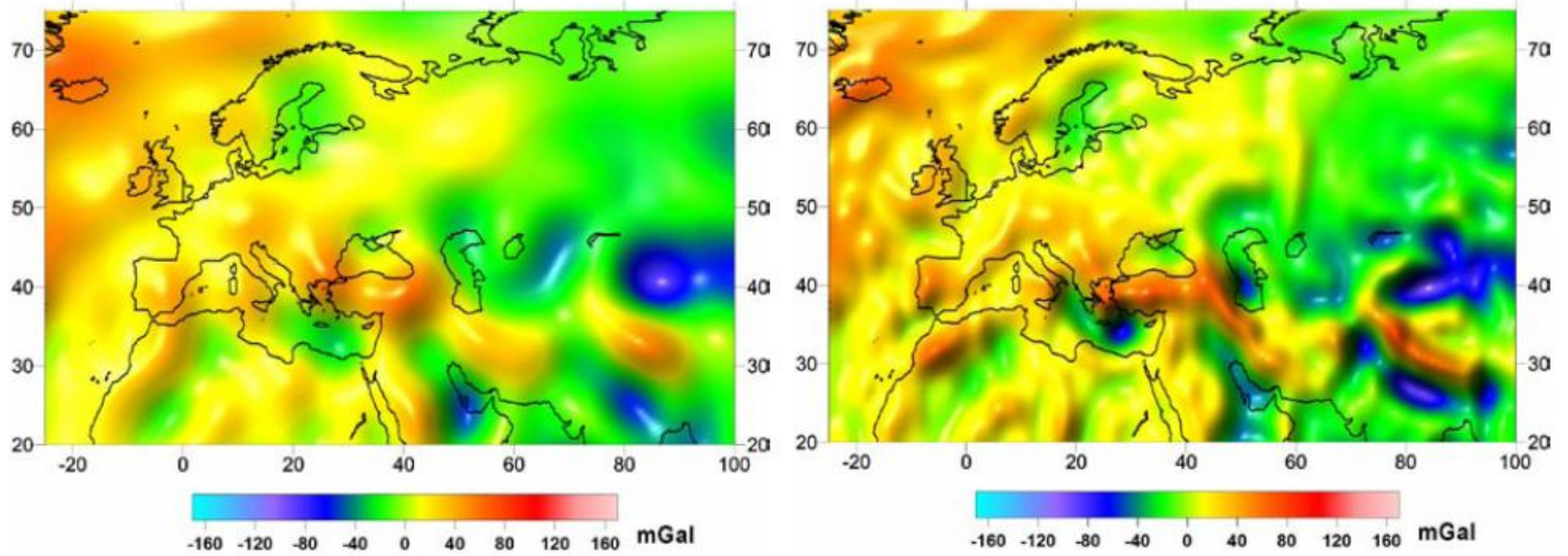


Figure 2.2: Gravity anomalies over Europe derived from the pre-CHAMP multi-satellite global gravity field model GRIM5-S1 (left) and a CHAMP-only model derived from 33 months of mission data (right).

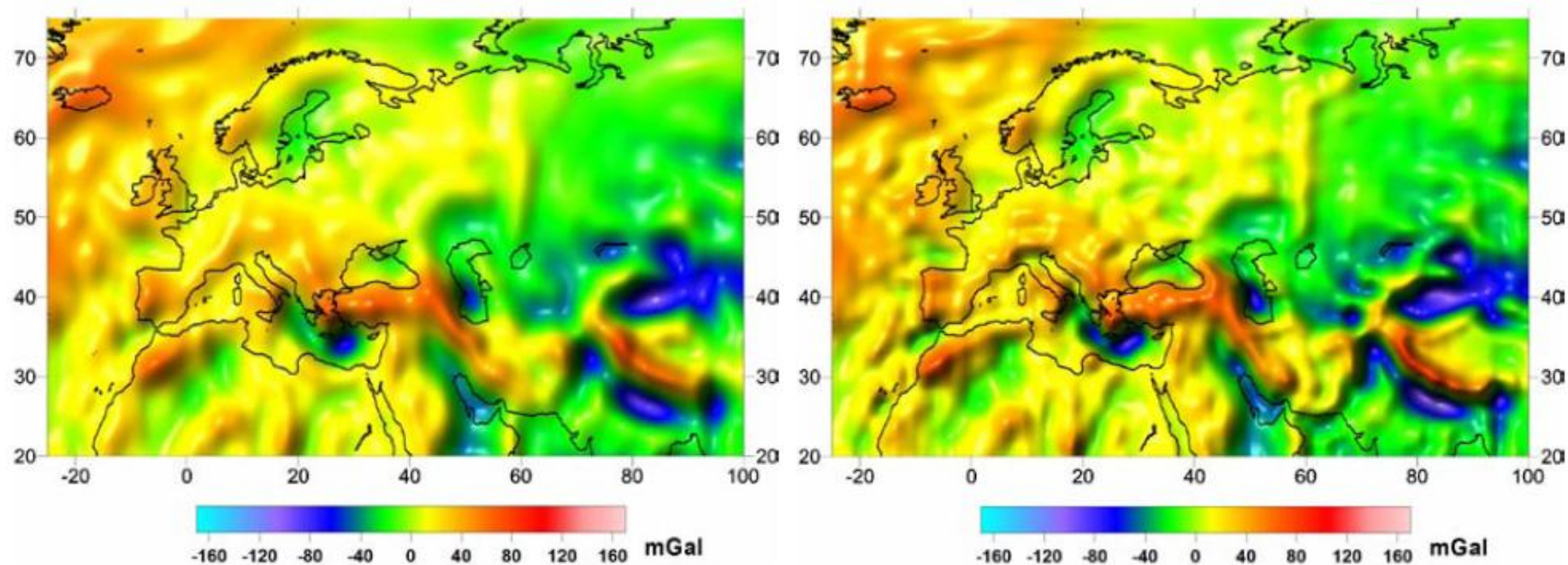


Figure 2.5: Gravity anomalies over Europe derived from 33 months of CHAMP data (left) and 110 days of GRACE data (right).

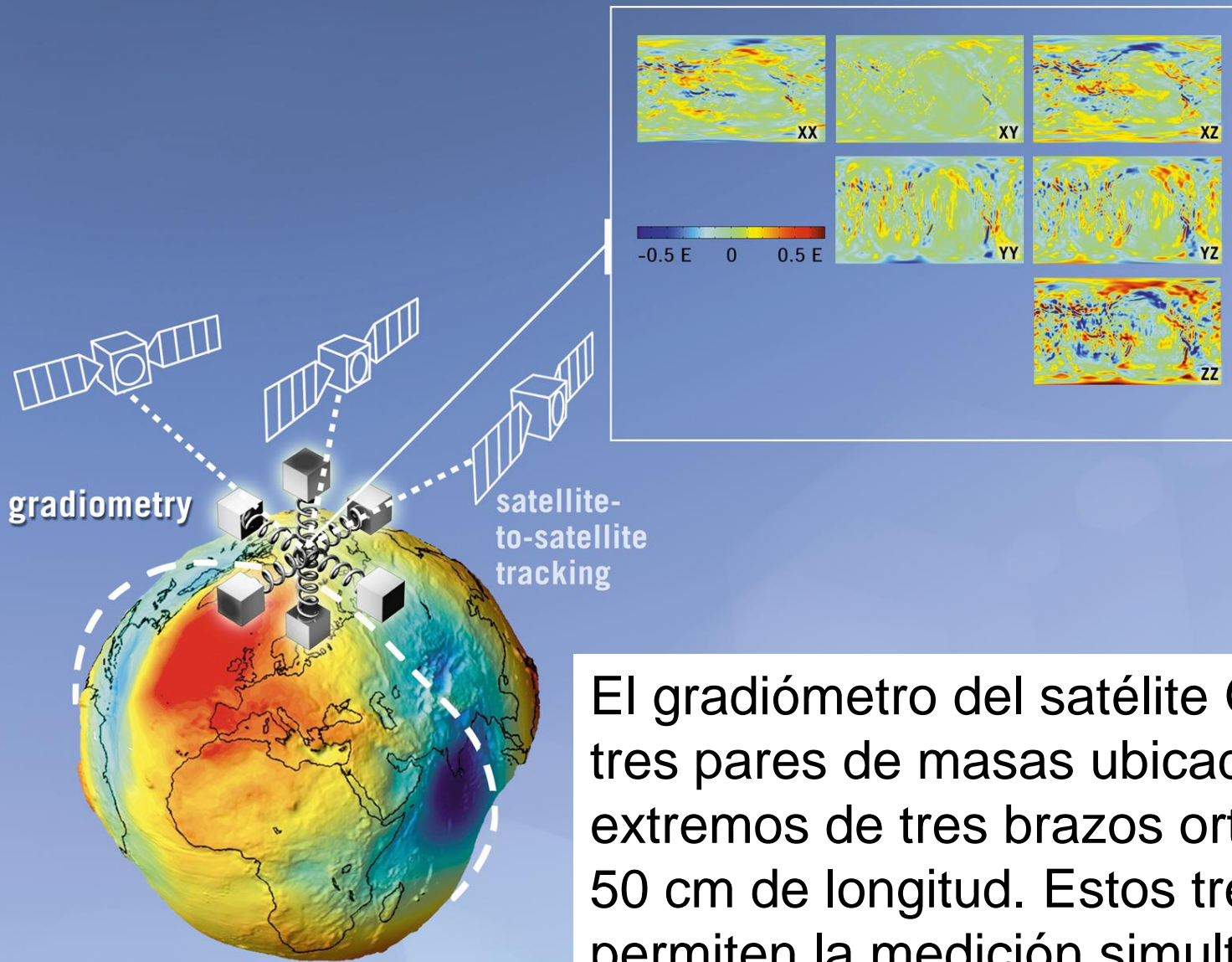


Figure 2.7: *The GOCE satellite. The orbit will be sun-synchronous, the same side facing to the sun over all the mission duration, to ensure thermal stability and power supply.*

GOCE por primera vez permitirá obtener el campo gravitatorio a partir de Gradiómetros con un ensamble de 6 acelerómetros triaxiales para medir en órbita los gradientes de gravedad. El satélite GOCE fue lanzado el 17 de marzo de 2009 y realizó mediciones hasta Noviembre de 2013, en una órbita extremadamente baja de 250 km de altitud.

GOCE está dedicado a medir el campo gravitatorio terrestre y a modelar el geoide con precisiones y resolución espacial sin precedentes (1 mGal de precisiones para el campo gravitatorio terrestre y 1 cm de precisión en las ondulaciones del geoide, con una resolución espacial mejor que 100 km).

Sus datos mejorarán, además del conocimiento geodésico, el conocimiento de la circulación oceánica, estudiando los cambios de energía en la superficie terrestre, cambios del nivel de los océanos y procesos físicos en el interior de la tierra.



El gradiómetro del satélite GOCE posee tres pares de masas ubicadas en los extremos de tres brazos ortogonales de 50 cm de longitud. Estos tres ejes permiten la medición simultánea de seis componentes independientes pero complementarias del campo gravitatorio.

Table 2.3: Mean gravity field recovery:
geoid (cm) and gravity anomaly (mGal) accuracy vs. resolution (1/2 pixel side length).

CHAMP (33 months) <i>achieved</i>	GRACE (110 days) <i>achieved</i>	Combined *) <i>achieved</i>	GOCE
10 cm, 1 mGal@350km; 1 cm, 0.02 mGal@650km	10 cm, 1 mGal@200km; 1cm, 0.02 mGal@330km	20 cm, 5 mGal@50km	
expected	expected	expected	expected
factor 1.5 improvement	factor 5 improvement	6 cm, 3 mGal@50km with GOCE	2 cm, 1 mGal@100km

*) CHAMP + GRACE + Surface Gravity Data

Modelo Gravedad Global 2014

