

“Egyszerű, mint Hamlet fuvolája (...) és miként abból a zenész gyönyörködtető változásokat tud kicsalni, úgy ebből a fizikus, a maga nem kisebb gyönyörűségére, kiolvashatja a nehézségnek legfinomabb változásait.”

[“Es simple, como la flauta de Hamlet (...) e igual que el músico que puede deleitarnos con espléndidas variaciones, el físico puede, con esta balanza, con no menos deleite determinar las más finas variaciones de la gravedad.”]



Loránd Eötvös de Vásárosnamény (1890)

INSTRUMENTAL Y APLICACIONES GRAVIMÉTRICAS

Prospección gravimétrica de Eötvös en el cerro Ság, Hungría
(foto Jurátus ELTE)

Loránd nació en 1848 en Buda (la parte de Budapest al oeste del Danubio), hijo de Ágnes y József, un poeta y político que integró el gabinete ministerial en ésa que era una de las dos capitales del Imperio austrohúngaro. Loránd llevó el título nobiliario de Barón, como su noble padre (del latín *nobilis*, conocido, a su vez de *gnoscere*, conocer), y había empezado abogacía, pero largó cuando le cayó la ficha de que la física le cuadraba más. Entonces se fue a estudiar sucesivamente a dos universidades del Reino de Prusia, la de Heilderberg (hoy parte de Alemania) y la de Königsberg (la rusa Kaliningrado tras la invasión soviética de 1945 que provocó matanzas, violaciones y expulsión masiva de la población alemana en venganza por las atrocidades del régimen nazi).

Loránd Eötvös volvió a Budapest con el doctorado, se casó (del latín *casa*; rito arcaico que ya muy pocos practican...), fue padre de tres niñas, inició una carrera científica brillante e incluso llegó a ser ministro de Educación y fundó numerosas escuelas. Realizó descubrimientos sobre capilaridad y tensión superficial, hizo investigaciones sobre el principio de equivalencia entre gravedad y masa inercial –que fueron fundamentales para la teoría general de la relatividad de **Albert Einstein**–, y definió los ya citados gradientes de la gravedad y el efecto de la fuerza centrífuga que lleva su nombre. El principio de equivalencia y las mediciones de gradientes fueron posibles merced a un modelo de péndulo por él diseñado y gracias a la balanza de torsión que inventó en 1890 a partir de la balanza de laboratorio que había perfeccionado **Henry Cavendish** en 1798 (para hallar la constante de gravitación y luego obtener el primer cálculo de la densidad promedio de la Tierra, de $5,5 \text{ g/cm}^3$). Y esa balanza de Eötvös (un gradiómetro) fue el primer instrumento diseñado específicamente para prospección gravimétrica, que él decía que disfrutaba tanto como la música y le permitió empezar a observar a profundidades que ningún pozo podía alcanzar.

Con ese gradiómetro, fabricado en buen número, se llevaron a cabo las primeras exploraciones del método gravimétrico en Europa y América del Norte. Esas balanzas de torsión permitieron descubrir los primeros domos salinos (diapiros halocinéticos) en la parte continental del golfo de México. Tenían una muy alta precisión y además daban mediciones muy completas, ya que permitían medir los gradientes o derivadas de la fuerza de gravedad en cualquier dirección. Pero...

He aquí que en la década de 1930 salieron al mercado los primeros gravímetros de resorte, aparatos que sólo miden la gravedad en el eje z, pero que son más pequeños, livianos y permiten lecturas mucho menos lentas. Y como “*time is money*” y los datos de estos gravímetros igual permitían la identificación de estructuras hidrocarbúricas del subsuelo, las balanzas fueron quedando en desuso, al menos en la actividad petrolera. Para entonces **Eötvös** ya había fallecido, en 1919, a los setenta y uno, pocos meses después del fin de la Primera Guerra Mundial que conllevó la desintegración del derrotado Imperio austrohúngaro.

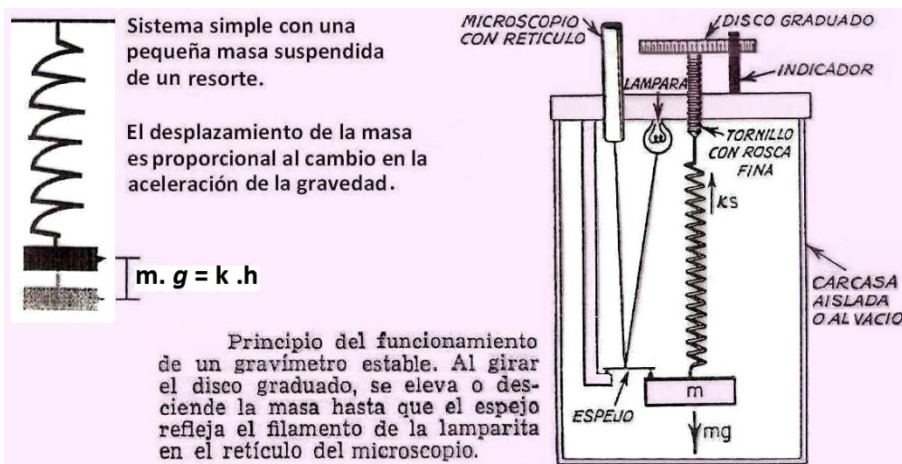
MEDICIONES DE GRAVEDAD RELATIVA

Como hemos apuntado, los trabajos pioneros de prospección gravimétrica fueron realizados con **balanzas de torsión**, que medían el gradiente de la gravedad y por ello fueron los primeros **gradiómetros** (también llamados **variómetros**). Aunque asimismo en esos tiempos se utilizaron **péndulos**, que eran y siguen siendo de operación lenta –y proveen lecturas mucho más apropiadas para mediciones absolutas–, de los cuales el más empleado fue el diseñado por el inglés **Henry Katter** en 1817.

Bueno, pero ya dijimos que desde 1930 se han utilizado los **gravímetros de resorte**, que miden directamente pequeñas variaciones de la componente vertical (z) de la gravedad relativa, respecto a una referencia o base principal. De modo que la mayor prestación de las balanzas de torsión no impidió su gradual extinción ni que su nicho ecológico (sobre todo exploración de hidrocarburos) fuese ocupado por esa nueva especie de menos lentos y más oportunistas gravímetros. Darwinismo geocapitalista puro.

Gravímetros estables

Basándose en la concepción del dinamómetro de **Isaac Newton**, fue el inglés **John Herschel** quien en 1833 ideó un gravímetro estable, pero recién desde 1930 empezaron a emplearse versiones perfeccionadas. Éstos fueron los primeros que se utilizaron en el campo, fabricados con un muelle o resorte único sobre el cual se accionaba el tornillo de ajuste entre mediciones. El cambio de la longitud del muelle se medía directamente por medio de una



(modificado de Chapin, 1998, y Howell, 1962)

amplificación (óptica, mecánica o eléctrica). Ejemplos fueron el Hartley, con amplificación mecánico-óptica, y el Gulf, sólo óptica. Estos aparatos dejaron de usarse porque para obtener mayor precisión había que fabricarlos demasiado altos y por lo tanto muy engorrosamente operables y transportables.

En todos los gravímetros la relación física que fundamenta su uso práctico es: **$m \cdot g = k \cdot h$**

(k es la constante del resorte en kg/s^2 y h el desplazamiento vertical en m)

Los aparatos tienen dos niveles de burbuja ortogonales en la parte superior y tres tornillos de apoyo basal para **asegurar la horizontalidad de las mediciones**.

En el **trabajo de rutina con cualquier gravímetro** (los antiguos estables y los posteriores inestables) el procedimiento es partir desde el primer punto base con un **cero de referencia relativa** (por el ocular se ve el retículo en el centro con el espejito horizontal, como muestra arriba la figura) y luego el operador se encamina al siguiente punto estación (cerca de esa base) donde si, como es probabilísimo, la aceleración g cambió, el retículo aparecerá corrido del centro debido a la inclinación del espejito causado por el desplazamiento de la masa. Entonces debe girarse el disco superior para que el tornillo haga subir o bajar el resorte, la masa se corra, el espejito vuelva a quedar horizontal y el retículo se centralice. Y luego debe observarse cuántas divisiones ha sido girado el disco y, sabiendo la constante de calibración o lectura del aparato (n u.g./división), podrá saberse cuántas u.g. o mGal en más o en menos (según la dirección de giro del disco) varió la aceleración g entre el primero y el segundo punto registrados.

La **constante de calibración o lectura del aparato** viene dada de fábrica pero podría variar con el tiempo. Una **forma de verificarla** es medir g en un punto (en el piso) e inmediatamente hacer una medición un metro más arriba (con un trípode). Dado que la diferencia por la corrección de aire libre debe ser de 3,086 u.g./m, sólo es cuestión de ver cuánto debió ser girado el disco para tener el retículo siempre en el centro. Así se conocerá cuántas u.g. corresponde leer por cada división del disco.

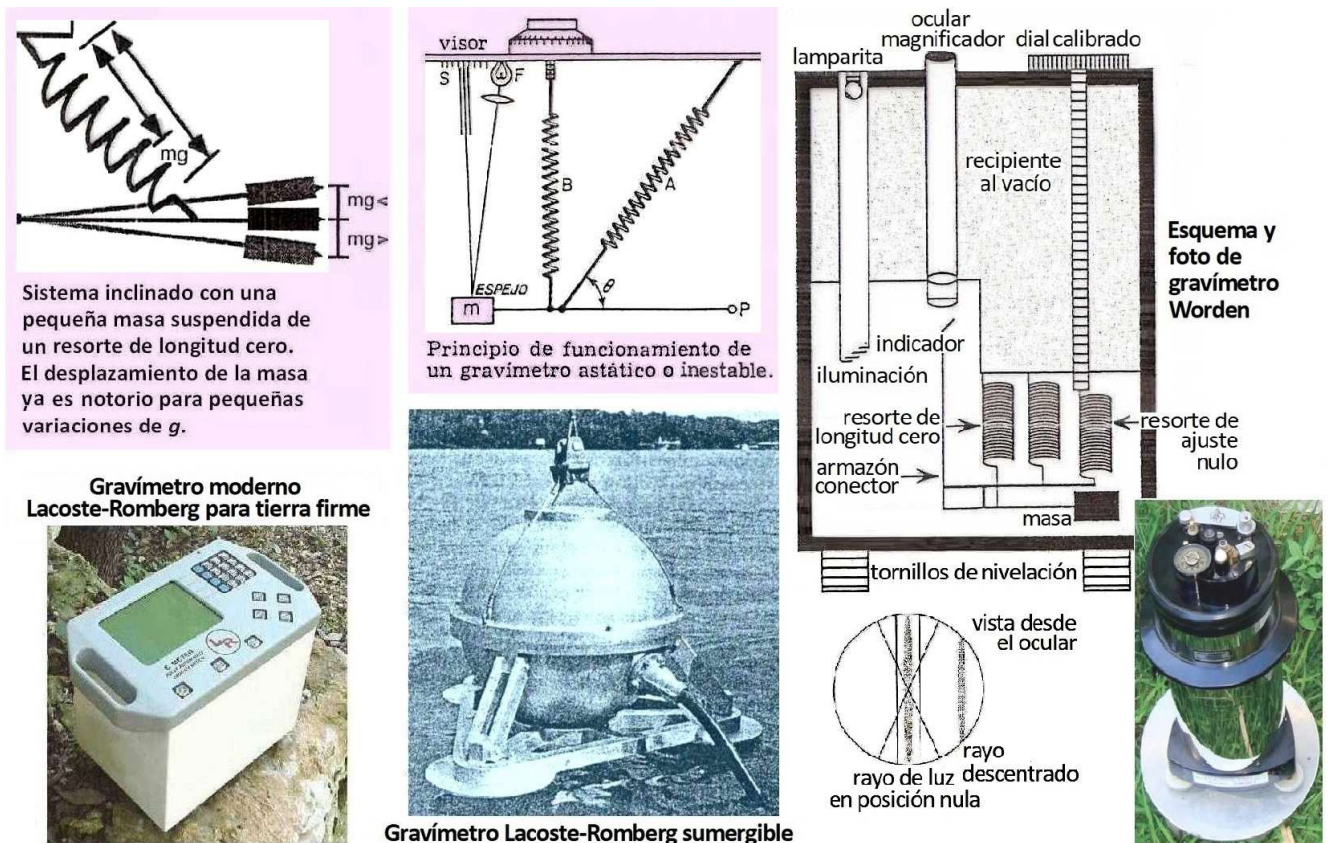
Los gravímetros siempre deben manipularse delicadamente evitando aceleraciones para no descalibrar los resortes. Por la misma razón, en cualquier medio de transporte deben llevarse sobre una base amortiguada.

El material de los muelles (inicialmente sólo metálicos, hoy mayormente de cuarzo) genera una **deriva** (en inglés, *drift*) que es necesario determinar. Esta variación que experimentan las lecturas respecto al tiempo se deben a las deformaciones no perfectamente elásticas del sistema (llamada **fatiga**; no imputable al operador en

este caso...) inevitablemente variante respecto al resorte ideal, más otras perturbaciones que eventualmente sufre un instrumento durante su trabajo. El efecto de la temperatura sobre la dilatación del muelle se minimiza con la aislación térmica que los gravímetros traen de fábrica, aunque igual hay que evitar horarios de mucho cambio térmico, pero también hay aparatos con termostato para trabajos de mayor precisión. *Estas consideraciones valen tanto para gravímetros inestables como para los antiguos estables en desuso.*

Gravímetros inestables o astáticos

Desarrollados en Estados Unidos entre 1932 y 1934 por **Lucien LaCoste** y su profesor **Arnold Romberg** (pero comercializados en escala recién después de la Segunda Guerra Mundial) constan de una masa suspendida inestablemente a través de un brazo de palanca, tal que para determinado valor de g la masa se encuentra en equilibrio. Basta un cambio chico de g para que se abandone el equilibrio y esto se traduzca en desplazamientos relativamente grandes. Posee dos muelles o resortes principales (y alguno más que puede ser complementario): uno para los ajustes de las mediciones, como en los gravímetros estables (con las divisiones en el disco superior) y otro para suspender el sistema llamado **resorte de longitud cero** (*zero length spring*) porque se comporta como si su longitud inicial fuese nula para aumentar la sensibilidad. Éste se apoya en un sistema tipo palanca de modo tal que la fuerza ejercida es proporcional a la longitud, en lugar de la distancia que se comprime, y así, al menos durante parte de su recorrido, no se ajusta a la ley del inglés **Robert Hooke**. Así el arreglo, que *también tiene su constante de calibración*, hace que el resorte se estire o contraiga en el orden de un micrón por miligal y permite mediciones mucho más finas. Hay muchas marcas comerciales, cada una con varios modelos.



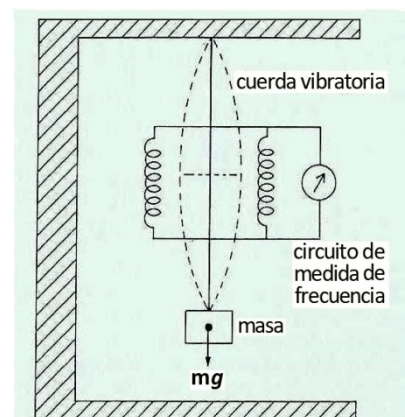
Esquema conceptual y diversas ilustraciones clásicas de gravímetros astáticos (modificado de Chapin, 1998; Howell, 1962; Burger, 1992; microglacoste.com, y Robinson & Coruh, 1988)

Existen diseños de gravímetros adaptados para ser bajados a **fondos marinos**: Graf, 1938, y luego LaCoste, 1952, con mando remoto (importante no sólo por practicidad sino porque permitió evitar muertes de buzos, cosa que ocurrió a operadores subacuáticos en las primeras épocas). Otra opción es trabajar desde la cubierta de **barcos** e incluso es posible hacerlo en mares profundos con un gravímetro sumergido 10 o 20 metros sobre el fondo desplazándolo por tracción a 2 o 3 km/h (Zumberge *et al.*, 1997). También desde **aviones** (ya desde la década de 1960), o para **pozos petroleros**, que vemos en la pág.64, todos construidos según el principio astático. Hay asimismo versiones avanzadas para **mediciones satelitales**, y hasta fue enviado a la Luna un diseño especial de LaCoste, con la misión *Apollo XVII* en 1972 cuando un geólogo integró la última tripulación que alunizó.

Gravímetros más modernos

Hace algunas décadas se idearon gravímetros **de resorte vibratorio** (con un sistema electromagnético de registro): al cambiar la gravedad de una a otra estación, cambia proporcionalmente la frecuencia de vibración de la cuerda de fibra que soporta la masa, como se ilustra a la derecha. Han sido poco empleados porque tienen mucha deriva.

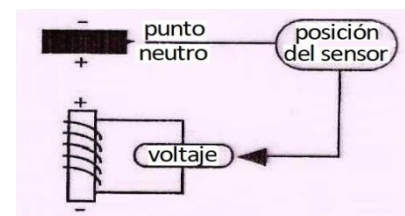
Otros gravímetros pueden funcionar **por levitación magnética** de un imán sobre un campo inducido por medio de una bobina (segunda figura a la derecha), base de desarrollos en curso para registrar en mar o vuelo. Se parte de un cero de referencia y el imán bajará en caso de ir a un punto con menor g ; por lo cual la magnitud que haga falta aumentar el voltaje para recentrar el imán será proporcional al Δg .



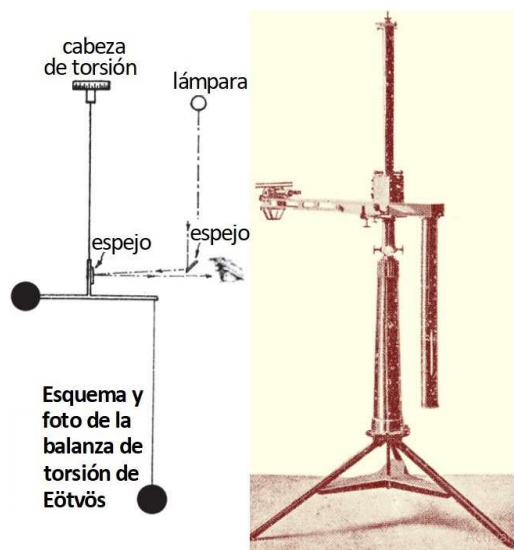
Esquema de un gravímetro de cuerda vibratoria. (modific. de Robinson & Coruh, 1988)

Gradiómetros o variómetros antiguos

Utilizados también para hacer mediciones de gravedad relativa. Los más antiguos, desde fines del siglo XIX, fueron las **Balanzas de torsión**, modificadas de la balanza de **Henry Cavendish** por el húngaro **Lorand Eötvös** tal lo ya apuntado. Miden directamente la variación horizontal, pendiente o gradiente de la gravedad y constan de dos masas iguales suspendidas de brazos a distintas alturas y con posibilidad de rotar en conjunto para situarse en la dirección de máximo gradiente horizontal de la aceleración gravitatoria (véase ilustración acá abajo).



Diseño de resorte virtual con sistema de retroalimentación de voltaje versus g . (modificado de Chapin, 1998)



(modificado de Jurátus ELTE)



Vistas externa e interna de un gradiómetro Bell 3D FTG del tamaño de un lavarropa y peso de 220kg.

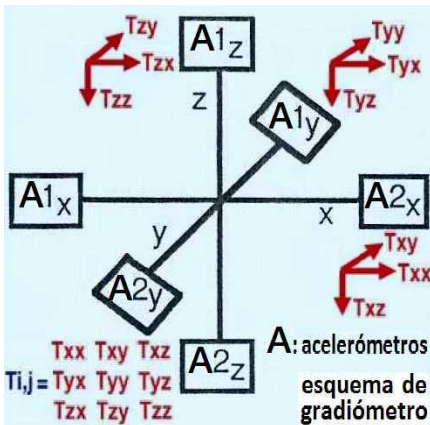
(modificado de Pajot-Métivier, 2007)

Gradiómetros o variómetros modernos

Empleados desde la década de 1970, van montados sobre una plataforma girocontrolada y **constan de 3 pares de acelerómetros** ensamblados en los ejes x, y, z –algunos visibles en la imagen inmediata de la derecha– que dan mediciones del gradiente de gravedad en las tres direcciones del espacio. Se los denomina **FTG (Full Tensor Gradiometer)**. Fueron inicialmente usados para navegación submarina, dado que registran el relieve, reemplazando al sonar durante la Guerra Fría, asegurando así una navegación silenciosa y por tanto indetectable. En 1993, tras la desintegración de la Unión Soviética, salieron del secreto militar y sus fabricantes pasaron a ganar más dólares por su nuevo uso para **prospección marina** (sobre todo petrolera) ya que, si bien muy costosos, **dan respuestas no influenciadas por el movimiento de la nave (porque las lecturas a cotejar son todas simultáneas)** y cualquier aceleración motriz o marina las afecta por igual) y son datos más completos que los de gravímetros que sólo miden g en z . Recuérdese que: $-\partial U/\partial z = U_z = g$ y $\partial U_z/\partial z = \partial g/\partial z = U_{zz}$

Nabla ($\nu\alpha\beta\lambda\alpha$) es la palabra griega, derivada del hebreo, que designa el arpa y sabemos que ∇ (nabla) es el operador gradiente, tal que en gravimetría: $\nabla = \vec{g} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z}\right)$

El tensor de gradiente gravitatorio T_{ij} tiene 9 componentes correspondientes a las 3 direcciones espaciales y las 3 componentes del vector aceleración, pero es simétrico (g es escalar y obedece a la ecuación de Laplace en el espacio libre, con las diagonales dando suma cero) por lo cual sólo 5 componentes son independientes y, para el



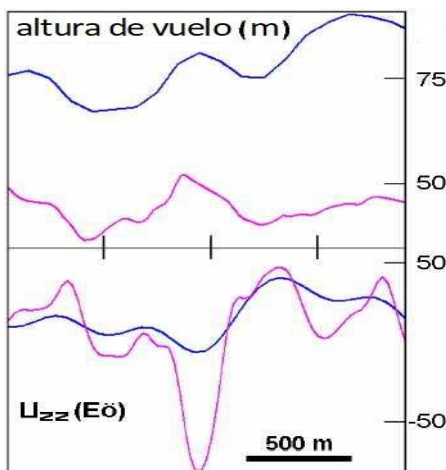
gradiómetro con orientación fija Norte, Este y Abajo, son: T_{zz} (o U_{zz} , gradiente vertical), T_{xz} y T_{yz} (U_{xz} y U_{yz} , gradientes horizontales) más los gradientes de curvatura diferencial U_{xy} y $(U_{xx}-U_{yy})/2$, este último con azimut oblicuo.

Son igualmente empleados desde aviones y helicópteros (evitando turbulencias bruscas de navegación). Un helicóptero puede volar a menos de 40 m de altura a unos 80 km/h, un avión a no menos de 80 m y 160 km/h, factores que pueden importar para ganar detalle (figura abajo). Otra opción en clima estable es un globo dirigible (20 m y 40 km/h). Las correcciones altimétricas son por la variación de cota y masa del relieve bajo la altura de vuelo establecida.

Se los utiliza para el cateo diamantífero (kimberlitas), de cobre y paragenéticos, carbón, diapiros halocinéticos (que entrapan hidrocarburos en los reservorios de sus flancos), etc. A continuación se ilustra su ventaja al registrar sobre un perfil geológico.



Barco de prospección geofísica marina en Noruega (foto PGS ASA)



Efecto de volar más bajo y lento –lila– respecto a hacerlo más alto y veloz –azul–; hay una chimenea de kimberlita en el centro del perfil registrado con gradiómetro en el NO de Canadá (modificado de Dransfield, 2007)

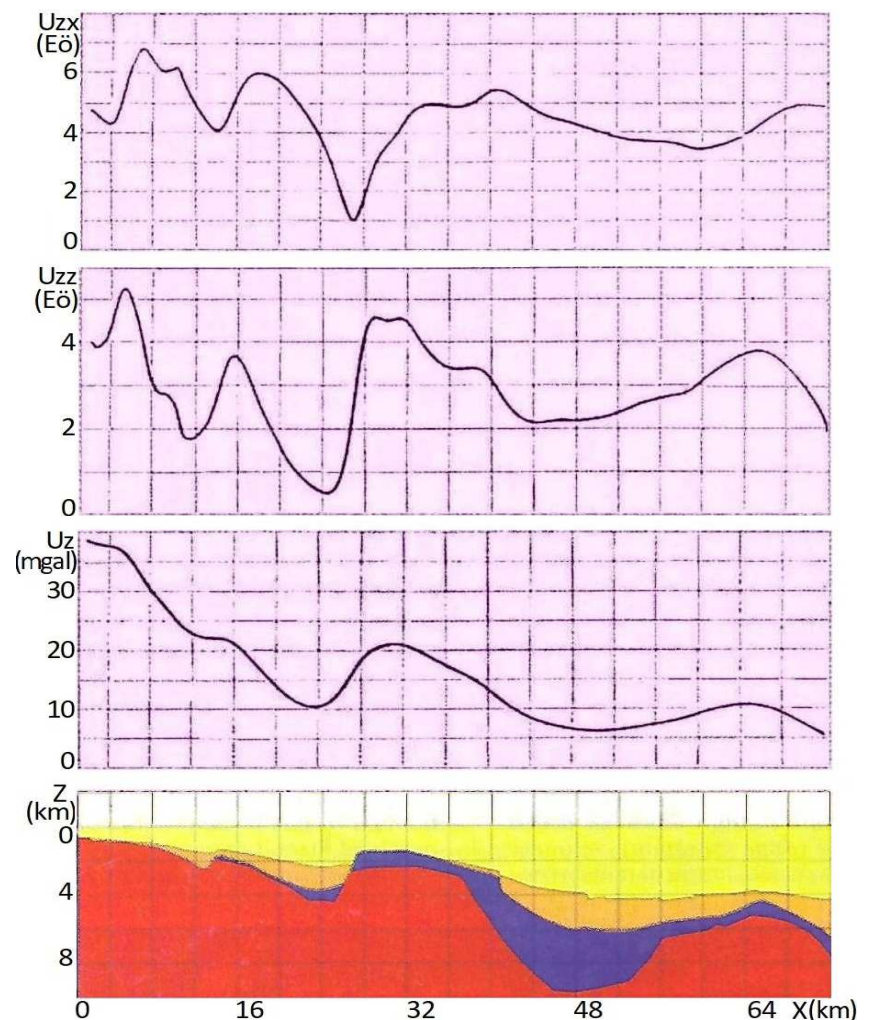
MEDICIONES DE GRAVEDAD ABSOLUTA

Péndulos

Basados en el sincronismo de su período, descubiertos por Galileo, fueron los primeros instrumentos usados y aún se los emplea.

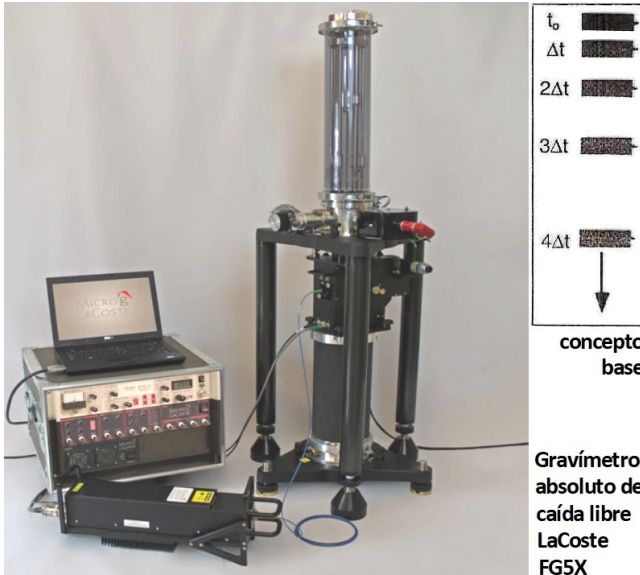
El período es: $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ (L es la longitud del péndulo ideal, casi igual a k, constante del sistema real)

De donde: $g = 4\pi^2 L/T^2$

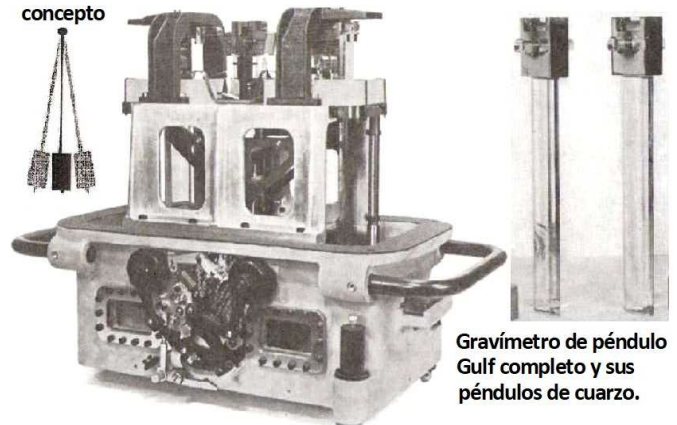


Modelado de repuestas de gradiómetro (U_{zx} , U_{zz}) de mayor detalle que las de un gravímetro (U_z) sobre el perfil que atraviesa una cuenca sedimentaria con δ decrecientes hacia arriba, sobre un basamento aún más denso –en rojo– (modificado de Pawlowski, 1998)

Como se mencionó, algunos péndulos también fueron usados hace más de un siglo para prospección.



(imagen de microglacoste.com)



(imágenes de Howell, 1962)

Aparatos de caída libre

Desarrollados en las últimas dos décadas, dan valores absolutos de g y existen modelos portátiles. Miden la gravedad en función de la caída de un cuerpo en un receptáculo en vacío (otra idea original de Galileo), haciendo las determinaciones repetidas veces a través de instrumental electrónico de muy alta precisión y

recordando que la distancia vertical recorrida es: $h=(1/2)g \cdot t^2$ (siendo t el tiempo de caída)

Gravímetros superconductores o criogénicos

De desarrollo reciente, consisten en una esfera hueca suspendida en un campo magnético generado por un toroide superconductor enfriado por un compresor de helio. Son utilizados para mediciones de gravedad absolutas y monitoreo fino de mareas y sismos. Vemos un ejemplo en la fotografía siguiente a la derecha.

Ya existen también versiones transportables, si bien de considerable tamaño (foto izquierda), que en estos casos dan mediciones relativas y acusan una ínfima deriva, del orden de $0,5 \mu\text{gal/mes}$. Son emplazados en lugares fijos por cierto tiempo para medir parámetros relativos a vulcanismo, sismicidad y respuesta gravimétrica ante la extracción de fluidos de reservorios geotérmicos, hidrocarbúricos o acuíferos.



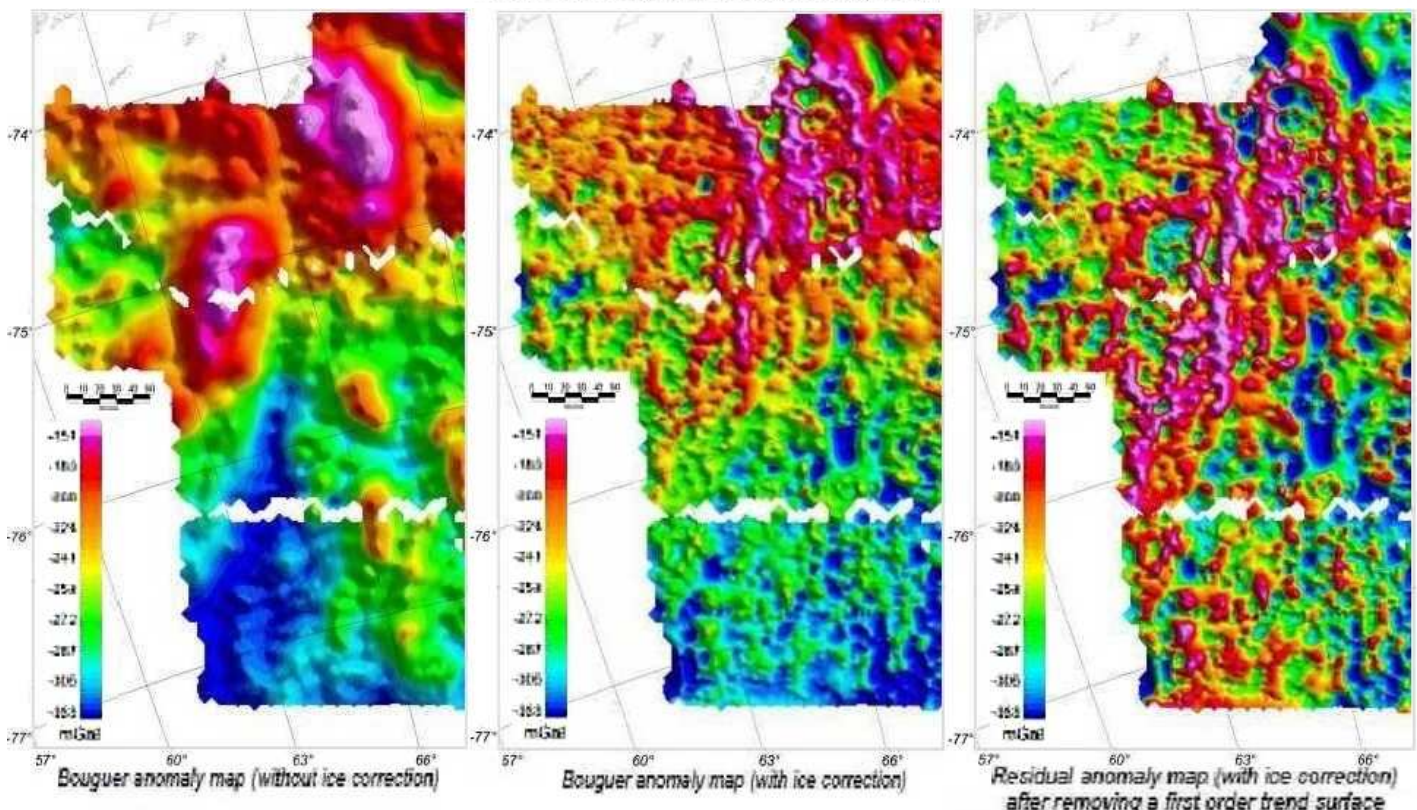
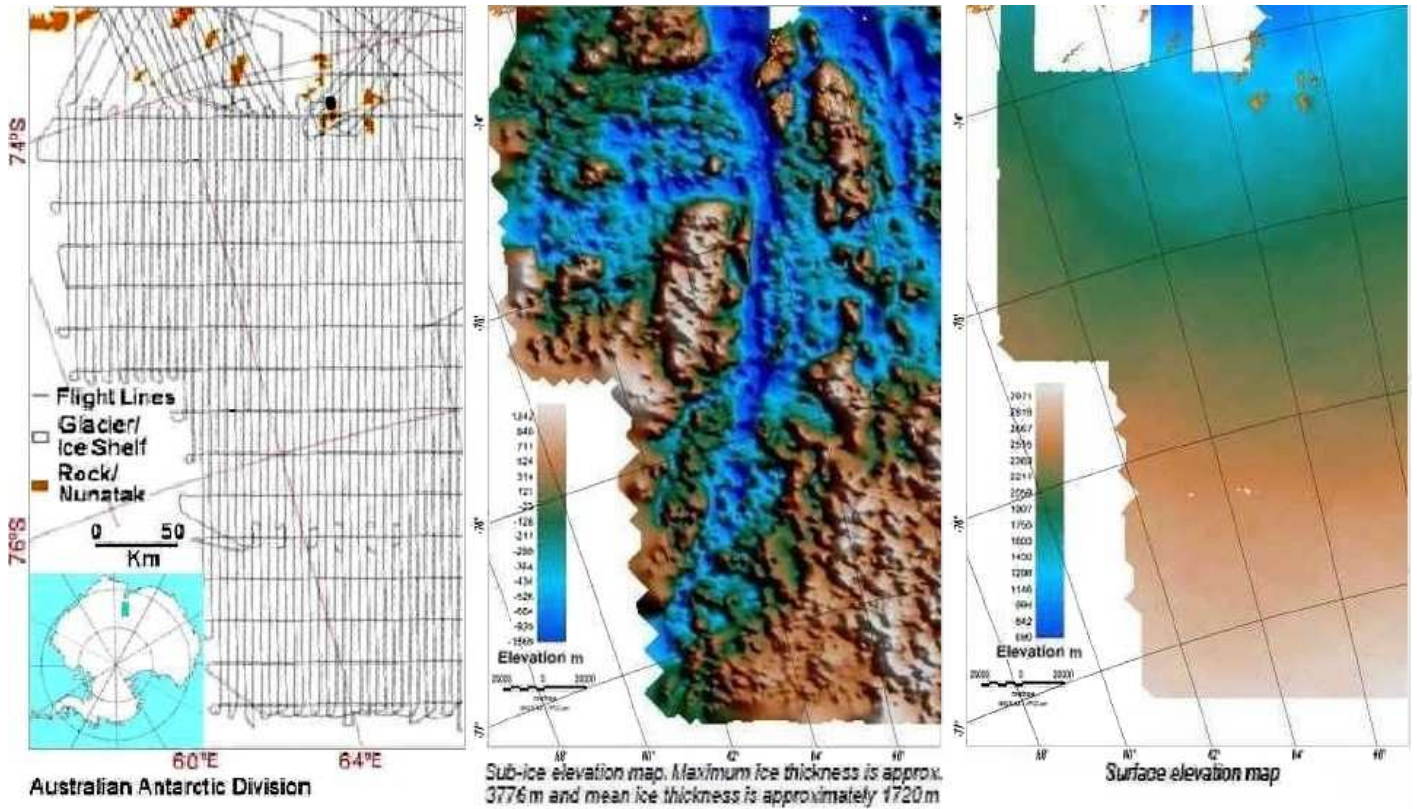
(imagen de gwrinstruments.com)



(imagen de anu.edu.au)

APLICACIONES GRAVIMÉTRICAS

Como ya fue en parte mencionado, hay *anomalías de Bouguer negativas* –siempre en magnitud relativa respecto a una referencia zonal– allí donde existen *sinclinales, bloques bajos de falla, domos evaporíticos, etc.* O sótanos ignotos... (¿con tubos de vidrio bien encochados?)... Los *altos gravitacionales*, en cambio, pueden presentarse si hay *rocas ígneas intruyendo una secuencia sedimentaria, sobre bloques altos o bien donde existen anticlinales* –porque en su núcleo las rocas más antiguas, generalmente más densas, se aproximan a la superficie– y en otras diversas conformaciones geológicas. Los objetivos pueden vincularse con el estudio de la geología regional con variados fines prospectivos, como el siguiente ejemplo en el este del continente antártico.



Antártida Oriental: líneas de vuelo sobre la calota, topografía subyacente, cota del campo de hielo (espesor desde 0 m en cada asomo de *nunatak* –pico aislado en lengua inuit– ¡hasta la friolera de 3.776 m!), luego el mapa de anomalía de Bouguer, el mismo mapa descontando el efecto del hielo sobrepuesto, y el plano residual (modificado de McLean *et al.*, 2004)

En algunos casos la adquisición de los datos es un *mallado terrestre de gran escala, o bien transectas generalmente perpendiculares a los principales rasgos tectónicos*. Hemos dicho que la gravedad puede ser medida tanto desde barcos como en vuelo, si bien con alguna merma en su precisión pero útil igual con fines

regionales o de escala intermedia, en ocasiones con gravímetros y otras veces con gradiómetros, mucho más costosos pero cuyos registros acreditan mucho menos ruido. *Son preferibles líneas de navegación rectas, paralelas entre sí y, como en otras modalidades, más o menos ortogonales a las estructuras, con algunas líneas de atadura en sentido perpendicular al antedicho, a velocidad constante evitando aceleraciones que generen ruidos en las lecturas.* Desde el aire se trata de seguir líneas de vuelo de altitud constante.

Finalmente, como también se refirió, existen *registros satelitales con fines fundamentalmente geodésicos.*

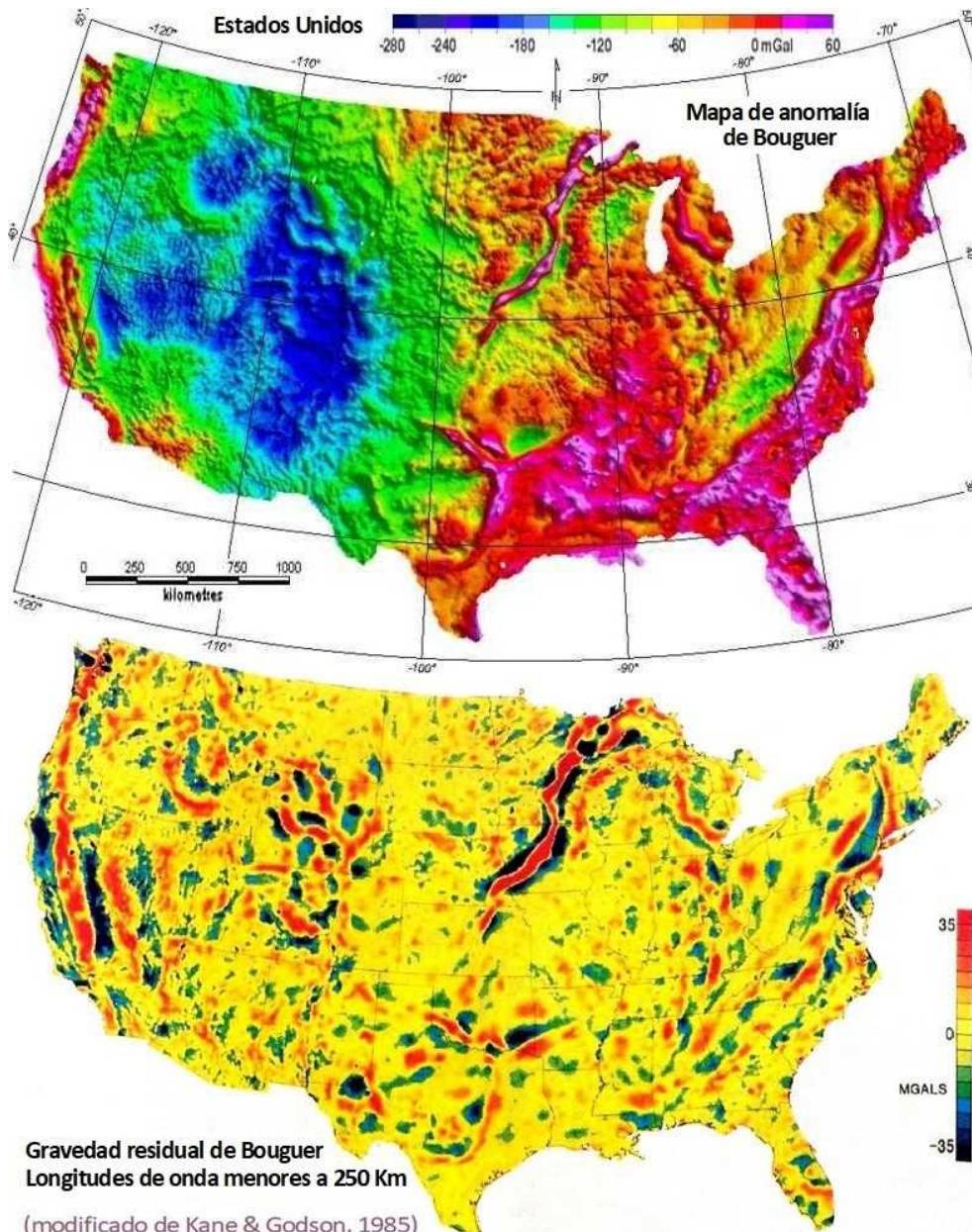
Muchos proyectos persiguen investigaciones corticales profundas, sea con adquisición desde altura o a pata.

Aquí mostramos el mapa de anomalía de Bouguer de los Estados Unidos (exceptuando Alaska, Hawái y demás

dependencias). Se lo ha producido a partir de armar un *rompecabezas de relevamientos hechos individualmente, previa homogeneización de los intervalos de muestreo, planos de referencia, etc.* Se pueden apreciar los *valores negativos sobre el orógeno que se halla actualmente activo:* las Rocky Mountains, en el centro-oeste, cuyas raíces tienen densidad más baja que otras rocas corticales igual de profundas. Y hay *valores positivos en las raíces exhumadas de un orógeno muy antiguo:* los Apalaches, al este, con densidades someras más altas que las de rocas sedimentarias modernas.

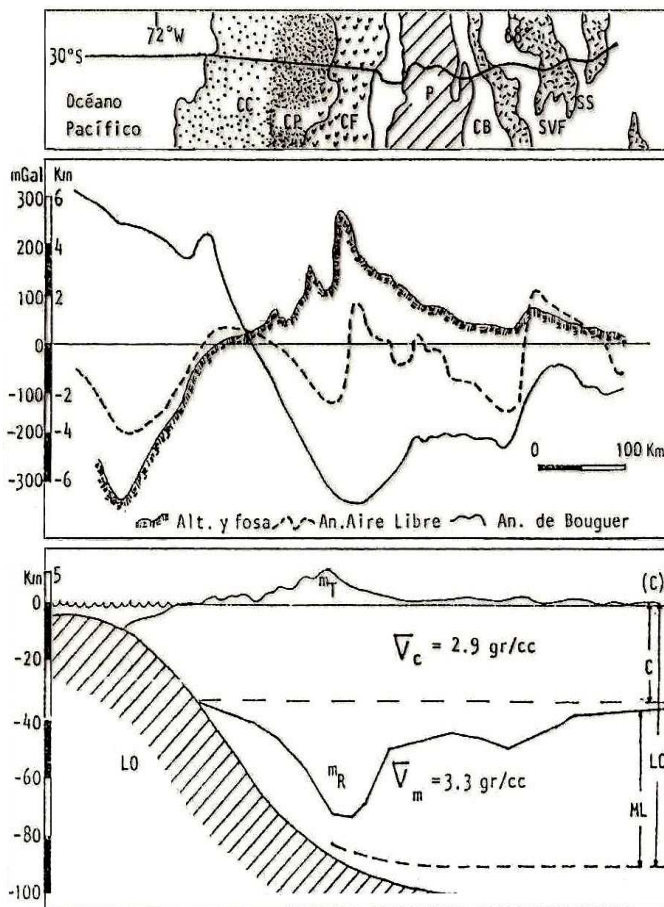
El mapa residual se procesó con la técnica de Fourier, empleando una longitud de onda de 250 km como límite máximo para lo que se considera somero. *Una cuenca del tamaño de la del Golfo San Jorge a esta escala continental ¡se toma con carácter de residual o local; no como regional!*

La serie de tres figuras a la izquierda en la página que

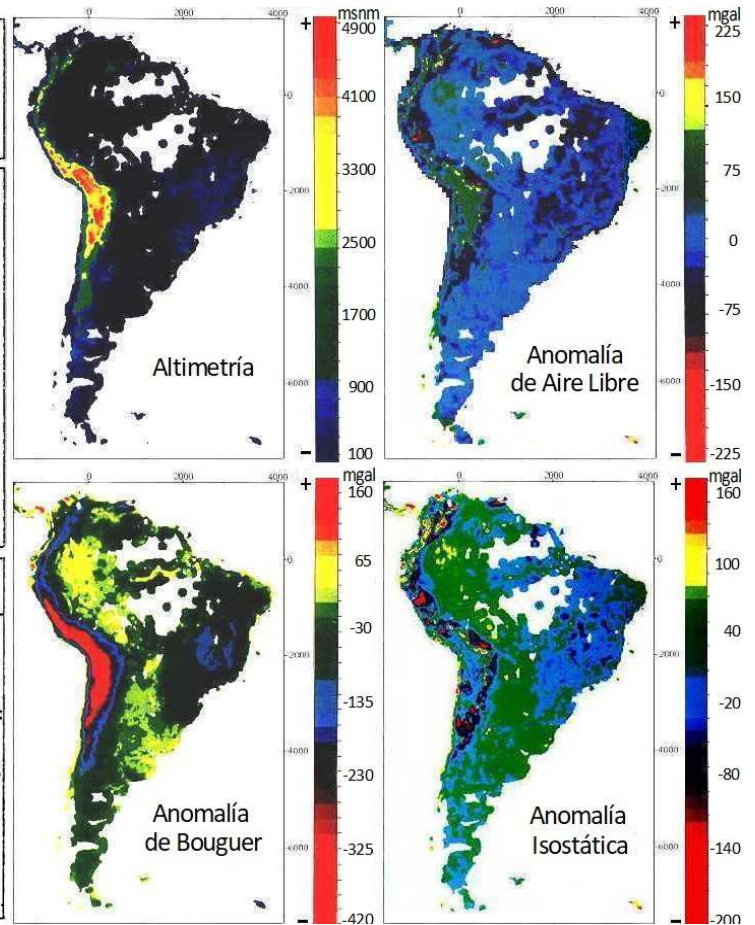


sigue son el mapa, el larguísimo perfil con los datos de gravedad procesados y el corte geológico interpretado. Corresponden a una transecta a escala cortical, desde las sierras Pampeanas de la región de cuyo, Argentina, hasta el Pacífico en Chile. La corteza continental granítica es bastante menos densa que el manto infrayacente y *la anomalía de Bouguer está descompensada por la ya citada eliminación metodológica de las antirraíces (el relieve).* *La anomalía de aire libre –sin supresión de la masa interpuesta que configura las antirraíces– da, en cambio, un resultado más semejante al de la anomalía isostática,* de manera que se la puede tomar como una primera aproximación antes de que se tenga la oportunidad de calcular el desbalance isostático con suficientes datos para armar el modelo. Los mapas a la derecha muestran, justamente, *la relativa similitud entre*

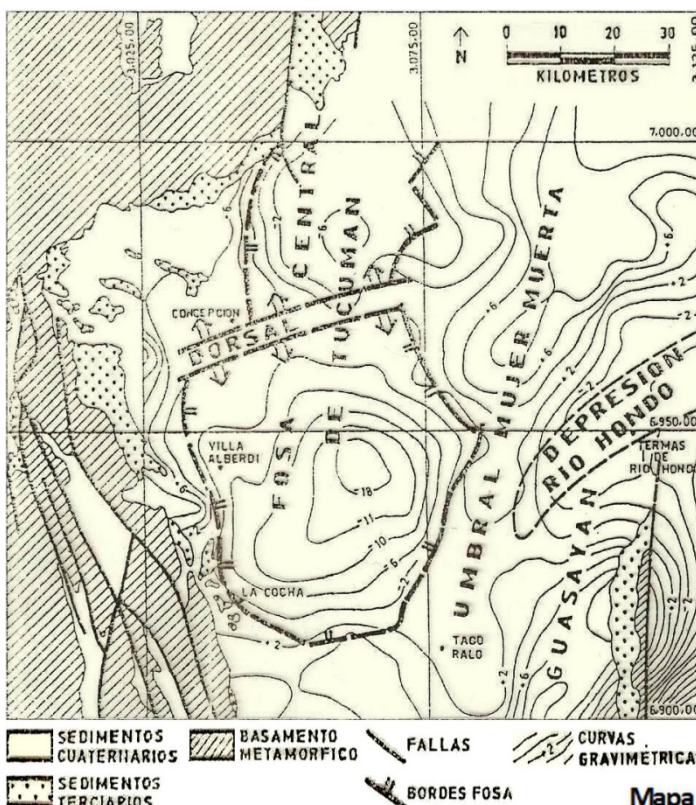
la anomalía de aire libre y la anomalía isostática modelada a escala continental, y los valores fuertemente negativos de Bouguer sobre el orógeno andino, como en las montañas Rocosas, Alpes, Himalaya, etc.



(modificado de Introcaso et al., 1990)

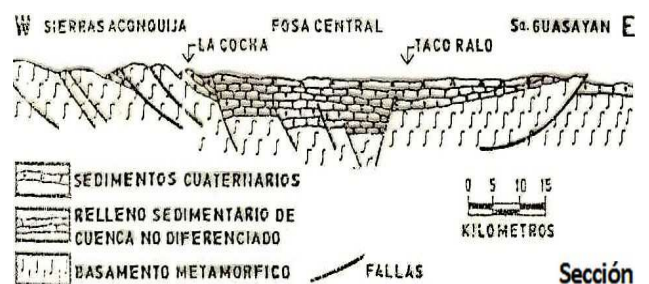


(modificado de Chapin, 1996)



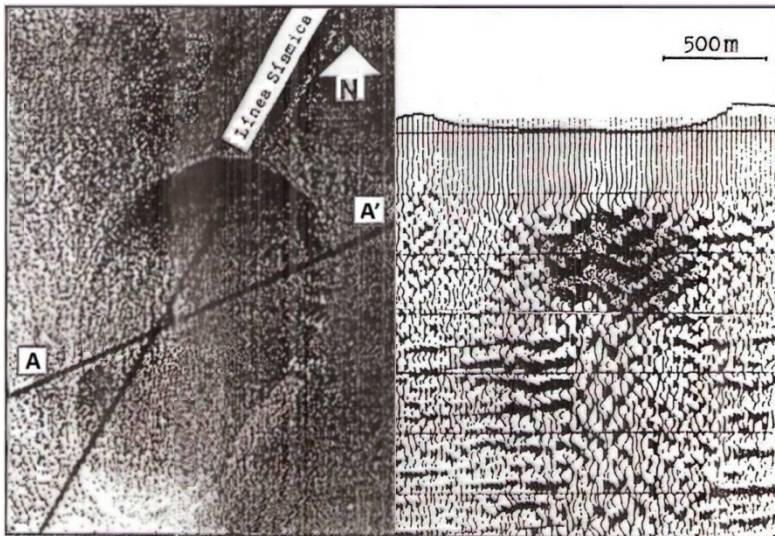
Mapa

El que sigue es un ejemplo de un relevamiento típico en una cuenca sedimentaria, en este caso un depocentro o fosa relativamente chica del noroeste argentino, entre las sierras Pampeanas de Aconquija y Guasayán. El mapa permite discriminar dos subcuencas (N y S) separadas por una dorsal (alto estructural). Pueden verse los *valores negativos de anomalía de Bouguer, más marcados en las áreas donde hubo mayor depositación de rocas de baja densidad (sedimentarias)*. Abajo el corte oeste-este muestra la interpretación realizada. Este tipo de cateo tiene bajo costo y es *muy útil en una etapa inicial de exploración petrolera para estimar espesores y estructura*.

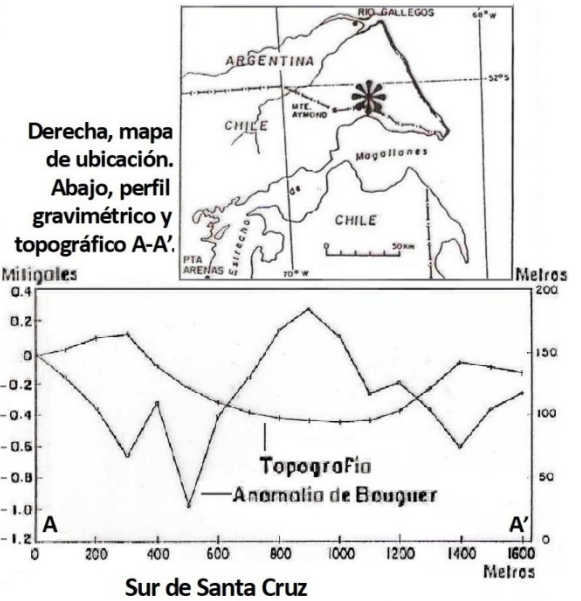


Sección

Cuenca de Tucumán (modificado de Mon et al., 1990)



Izquierda, imagen satelital del maar Magallanes indicando línea sísmica y traza del perfil gravimétrico. Derecha, sección sísmica (con su perfil topográfico) en la que se interpreta un cuerpo intrusivo subvolcánico.



Derecha, mapa de ubicación. Abajo, perfil gravimétrico y topográfico A-A'.

Sur de Santa Cruz (modificado de Pomposiello et al., 1991)

Pero además existen otras diversas aplicaciones de la gravimetría a menores escalas, como el ejemplo de la figura acá arriba, en la cuenca Austral: un *maar* (voz germánica para cráter freatomagmático) con una *intrusión ígnea subvolcánica visible en la sísmica de reflexión y en el perfil de detalle de la anomalía de Bouguer*, generada por el contraste de densidades. Es cómo podría visualizarse una masa rocosa densa de interés minero.

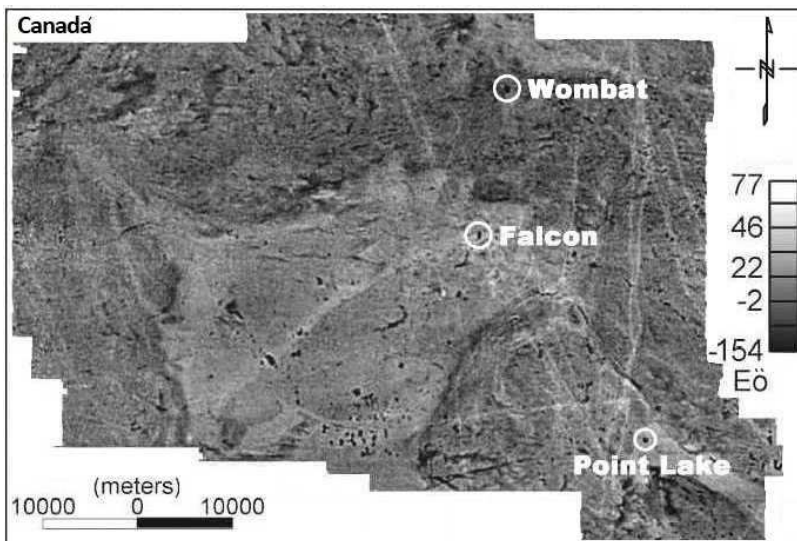
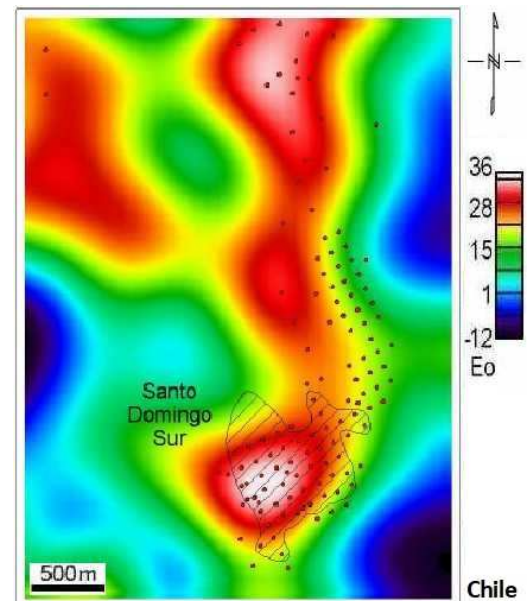


Imagen del gradiente vertical de gravedad a partir del cateo en Falcon Ekati. Los rasgos visibles en oscuro son bajos gravimétricos aislados, algunos de los cuales se deben a chimeneas de kimberlita, mientras que los rasgos claros alargados y sinuosos son debidos a diques intrusivos. Además hay una amplia variación en el sombreado en función de la geología donde se emplazan.

(figuras modificadas de Dransfield, 2007)



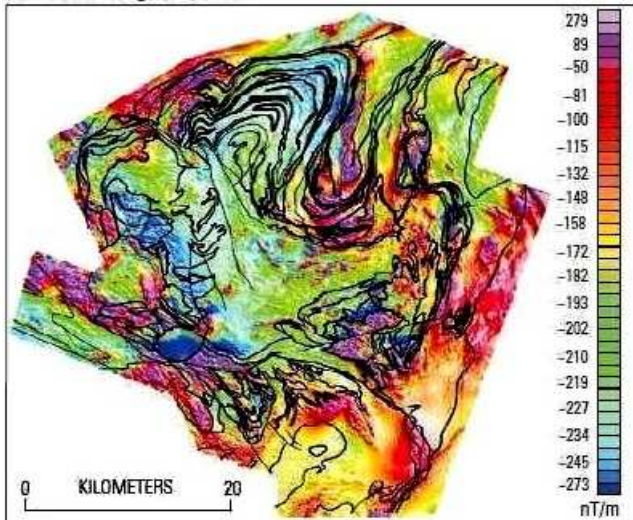
Mina de oro, cobre y óxido de hierro. La imagen muestra cómo coteja la respuesta gravimétrica con la mineralización que se mapeó a partir de datos de perforación.

Inmediatamente arriba vemos dos mapas de la derivada vertical de la gravedad (gradientes en eötvos, o sea mgal/km) en zonas de yacimientos minerales. A la izquierda de diamantes en kimberlitas del noroeste de Canadá y a la derecha de cobre y asociados en el centro-norte chileno. El empleo de gradiómetro en líneas de vuelo ha permitido conseguir una mejor definición de las anomalías densas de interés.

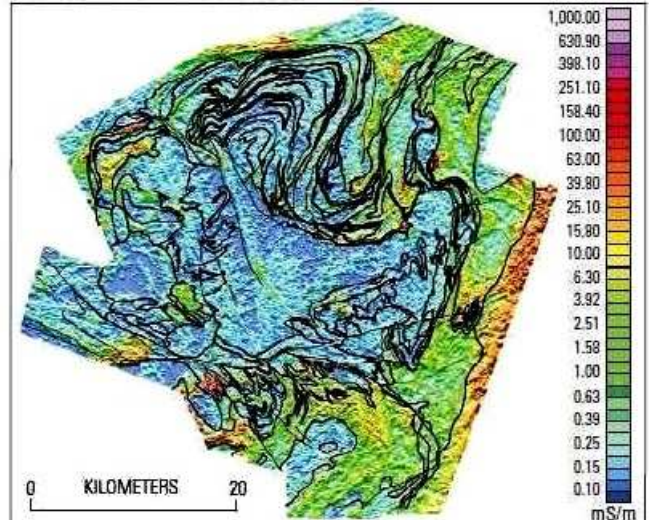
Puede determinarse si existe una depositación de minerales hidrotermales por su contraste de densidad respecto a las rocas del entorno del yacimiento. Según sea la interacción química en la zona alterada, puede haber hidratación, hidrólisis, metasomatismo, silicificación, oxidorreducción y/o sulfuración, con disolución o precipitación de minerales, reemplazos, intercambios iónicos y/o crecimientos cristalinos. Y en cada caso específico la porosidad y densidad pueden ser diferentes en el halo o sector anómalo.

El siguiente ejemplo aquí presentado corresponde a un *yacimiento minero de sulfuros masivos* del sudeste de Canadá. Manifiesta una zona de altos valores de g en el mapa de anomalía de Bouguer en razón de la presencia de una masa ígnea de interés económico. Pueden apreciarse en forma conjunta las respuestas dadas por otros campos físicos (que son abordados en temas sucesivos), todos acá registrados simultáneamente en forma aérea. La utilización de diferentes métodos naturalmente coadyuva a determinar con mucha mayor probabilidad de acierto el tipo de modelo geológico del subsuelo causante de tales anomalías.

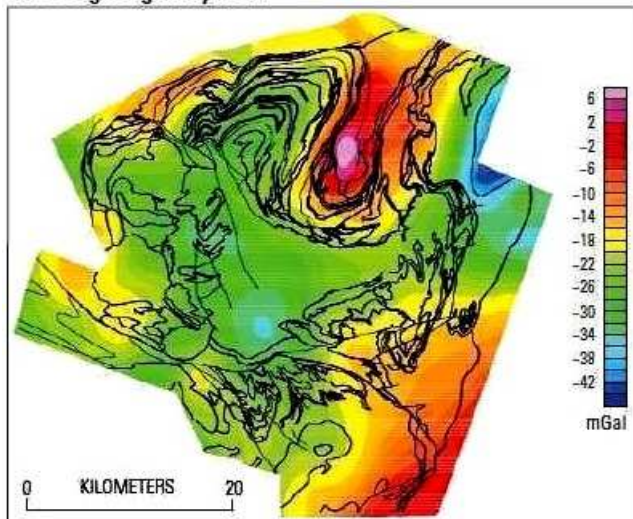
A. Total magnetic field



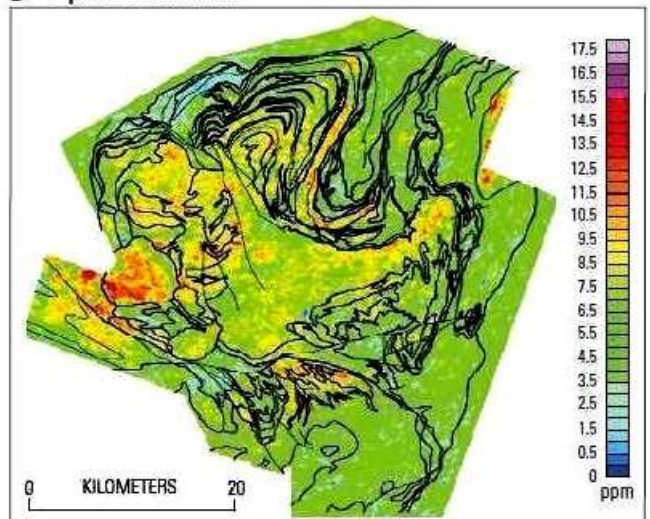
B. Apparent conductivity (4433Hz)



C. Bouguer gravity field



D. Equivalent thorium



Registros geofísicos aéreos sobre el área minera Bathurst (New Brunswick, Canadá).

A, mapa de intensidad magnética total; colores cálidos representan zonas de valores altos y colores fríos zonas de valores bajos; los sectores de color rojizo y amarillo correlacionan con basaltos portadores de magnetita. B, mapa de conductividad aparente medida con alta frecuencia; zonas en rojo y amarillo representan lutitas negras bastante conductivas conteniendo sulfuros. C, mapa de anomalía de Bouguer. D, mapa de equivalente torio que sirve para identificar fácilmente rocas con altas concentraciones de torio (indicadas en rojo y amarillo) tales como granitos y rocas volcánicas félsicas.

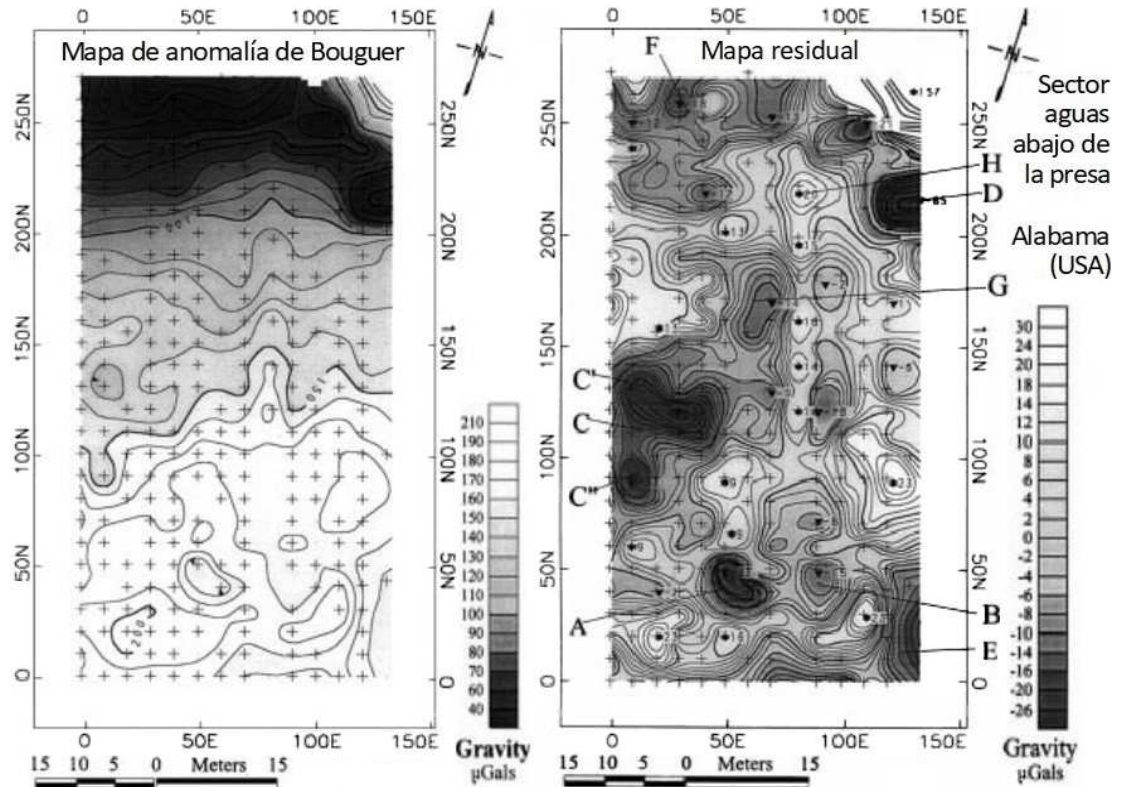
(modificado de Morgan, 2012)

Una distinta aplicación obvia es la *detección de cavernas* (por ejemplo por disolución cárstica) y *de túneles*, incluyendo, si fuera de interés, los tubos de lava en el interior de coladas terrestres y de la Luna; estos últimos son considerados como posibles emplazamientos para futuras bases selenitas. Otras *aplicaciones a una menor escala son las hidrogeológicas* (basamentos de acuíferos, etc.), las *medioambientales* (como la detección de piletas de petróleo o basurales tapados), también las referidas a trabajos de *exploración arqueológica* (por ejemplo construcciones con bloques densos yaciendo bajo sedimentos ligeros) o para *fundaciones en ingeniería civil* (rocas de base para diques, puentes u otras obras).

Mediciones microgravimétricas

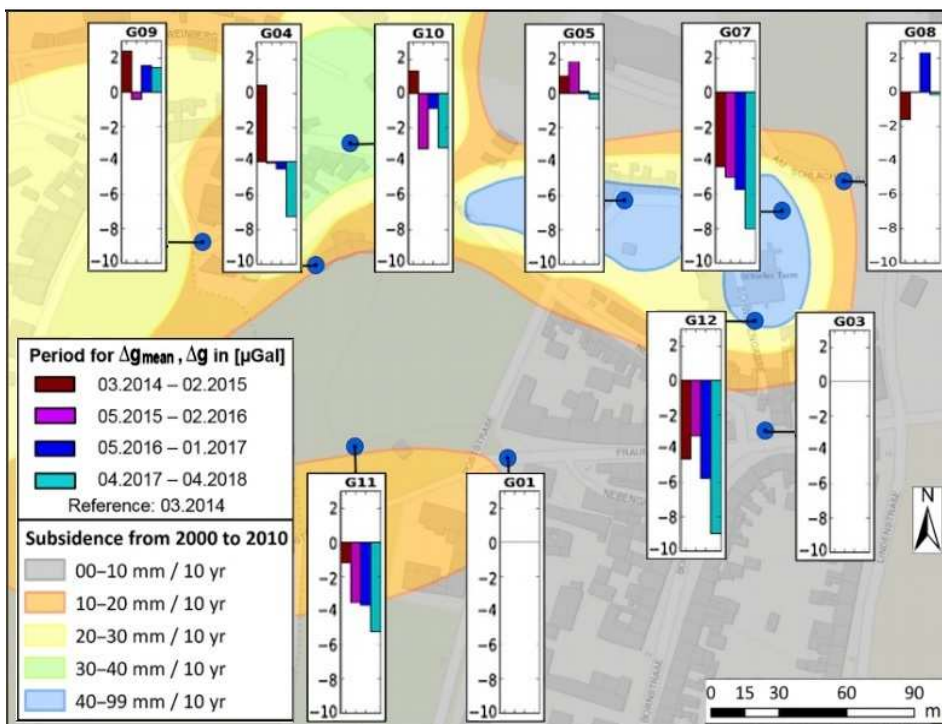
Se trata de mediciones hechas con gravímetros de altísima precisión, generalmente en áreas muy acotadas, con diversas finalidades para las cuales las mediciones convencionales no ofrecen resolución suficiente, como en este ejemplo en el que se evaluó la solidez del terreno en el entorno de un dique a fin de decidir si era necesario sellar eventuales vías subterráneas de fuga del agua embalsada para evitar futuros colapsos.

Microgravedad (mapa de Bouguer y su residual) adyacente a una represa; las letras mayúsculas indican los lugares más anómalos (modificado de Yule *et al.*, 1998)



Mapas de microgravedad. Las letras mayúsculas indican los principales lugares anómalos.

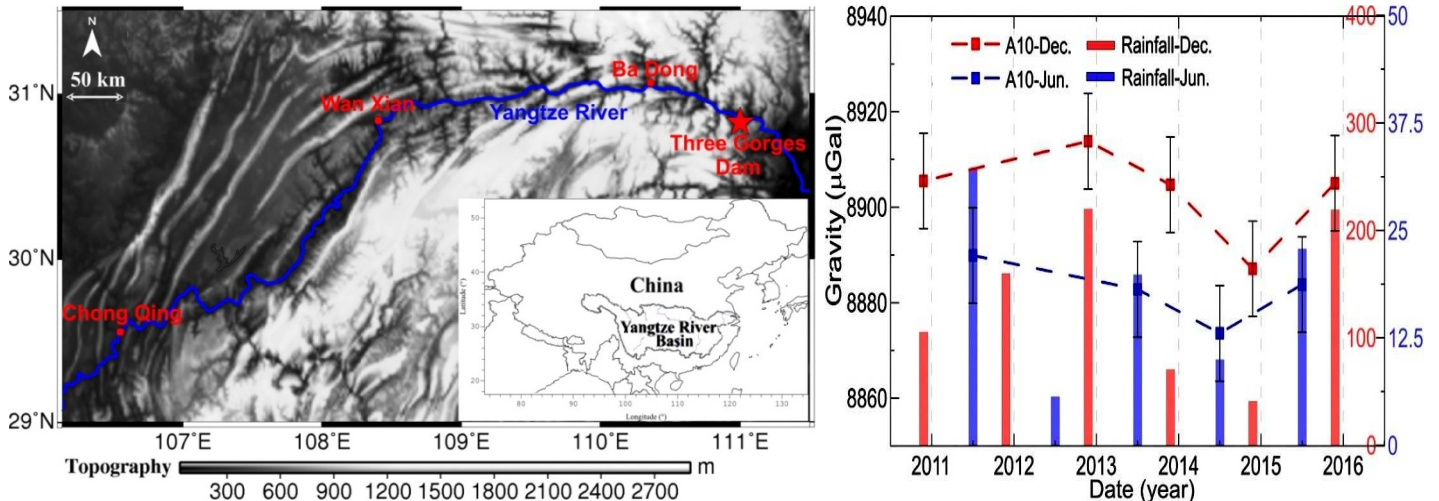
Véase la pequeñez del área que se estudió, si bien ésta es sólo una de las dos mitades (la otra es aguas arriba) y obsérvese lo precisísimo de las mediciones realizadas, en más de 600 estaciones, la mitad a cada lado de la presa.



Alemania, subsidencia monitoreada mediante registros de microgravedad reiterados durante varios años (modificado de Kobe *et al.*, 2019)

En la figura a la izquierda se presenta el resultado de otro relevamiento a través de microgravedad, en este caso en Alemania, repitiendo los registros de cada estación a intervalos de tiempo; la modalidad que se denomina *time-lapse*. En cada punto se representa la variación de g (de +2 a -10 μg) en cuatro períodos sucesivos cuyas fechas se indican. Y vemos el mapa de la subsidencia del terreno en mm (obtenida de finas nivelaciones entre los años 2000 y 2010), cuya causa fue la suberosión por disolución produciendo el crecimiento de cavidades en el subsuelo que hacen ceder el suelo y podrían incluso causar colapsos bruscos (caso de los cenotes mayas).

El siguiente ejemplo refiere a la variación temporal de la gravedad inducida por el cambiante volumen del reservorio superficial de agua en el área del mayor embalse mundial, el de la represa Tres Gargantas (三峡, Sānxiá) sobre el río Yangtsé o Largo (长江, Cháng). Se basa en relevamientos de gravedad terrestre y satelital mediante la misión GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) con el complemento del *Water GAP Global Hydrology Model*, datos meteorológicos de precipitaciones locales y un modelo de infiltración del agua del embalse hacia los acuíferos conexos, lo cual también contribuye a alterar las mediciones gravimétricas. Se observa una evidente estacionalidad que además fluctúa de año en año en función de las naturales oscilaciones climáticas, con repercusiones en la disponibilidad de agua para riego, consumo humano y generación eléctrica.



Izquierda, ubicación del dique (★) en la cuenca del río Yangtsé en China; derecha, variación anual de la gravedad absoluta A, medida los días 10 de junio y 10 de diciembre versus las precipitaciones pluviales de esos mismos meses, que incrementan el volumen total de agua embalsada e infiltrada en las rocas permeables del subsuelo (modificado de Wang *et al.*, 2019)

Gravimetría aplicada a la prospección de hidrocarburos

La prospección gravimétrica ha sido muy utilizada en las primeras etapas exploratorias de las cuencas sedimentarias, visto que, además por su bajo costo relativo, **produce buenas imágenes de la forma cuencal, sus variaciones de espesor y la conformación de sus principales estructuras**, que pueden eventualmente configurar trampas de hidrocarburos, tal como vimos en el ejemplo de la fosa de Tucumán. La mayor proximidad a la superficie del basamento –o de rocas densas en general– se expresa en aumentos de la aceleración de la gravedad y por tanto de la anomalía de Bouguer observada en mapas y cortes. A la inversa, con mayor profundidad del basamento –o rocas someras de baja densidad– habrá anomalías de Bouguer negativas respecto al cero de referencia regional.



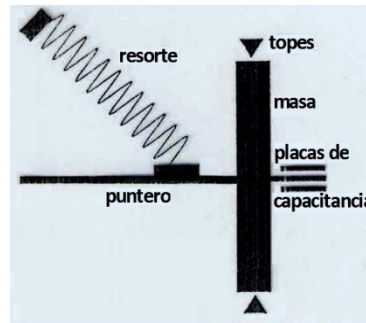
Adquisición gravimétrica en Yemen (fotos S.E.G.)

aérea. O mediciones en tierra pero con facilidades de transporte por helicóptero, tal como se ilustra para el caso de Yemen (sur de la península Arábiga, desde 2014 en atroz guerra civil fogueada desde el exterior).

A escala local, con mediciones de precisión, también se pueden obtener resultados afinados que resultan muy útiles en temas hidrocarbúricos si se los interpreta mediante modelos apropiados, recurriendo siempre a la separación de componentes someras, profundas y eventualmente intermedias de la gravedad, conceptos relativos según la escala como ya mencionamos. La **componente profunda de un estudio de impacto ambiental** (ejemplo piletas de petróleo mal tapadas) puede ser la más somera posible si se la refiere a nivel de estudio de cuenca.

Perfilaje de g en pozos

Como adelantamos, la gravedad puede medirse directamente a través de un perfilaje en un sondeo petrolero, como también minero o para otros fines. Existen varios sistemas de medición; en la figura se bosqueja un *gravímetro inestable*, se ve fuera del pozo la herramienta de uno con tecnología miniaturizada MEMS (Micro ElectroMechanical System) así como un *acelerómetro* (van tres: en x, y, z) y el *giróscopo siempre necesario* para saber la orientación dentro del pozo ya que el cable hace girar la herramienta de manera aleatoria. En el camión de perfilaje, situado junto a la boca de pozo, el programa computacional atinente va calculando diferencias de g entre puntos sucesivos y de allí después surgen los cálculos de densidad que resultan para cada intervalo atravesado y medido.



Esquema de sistema de registro de gravímetro inestable de pozo



Registro de diferencia de g entre dos puntos para luego calcular δ



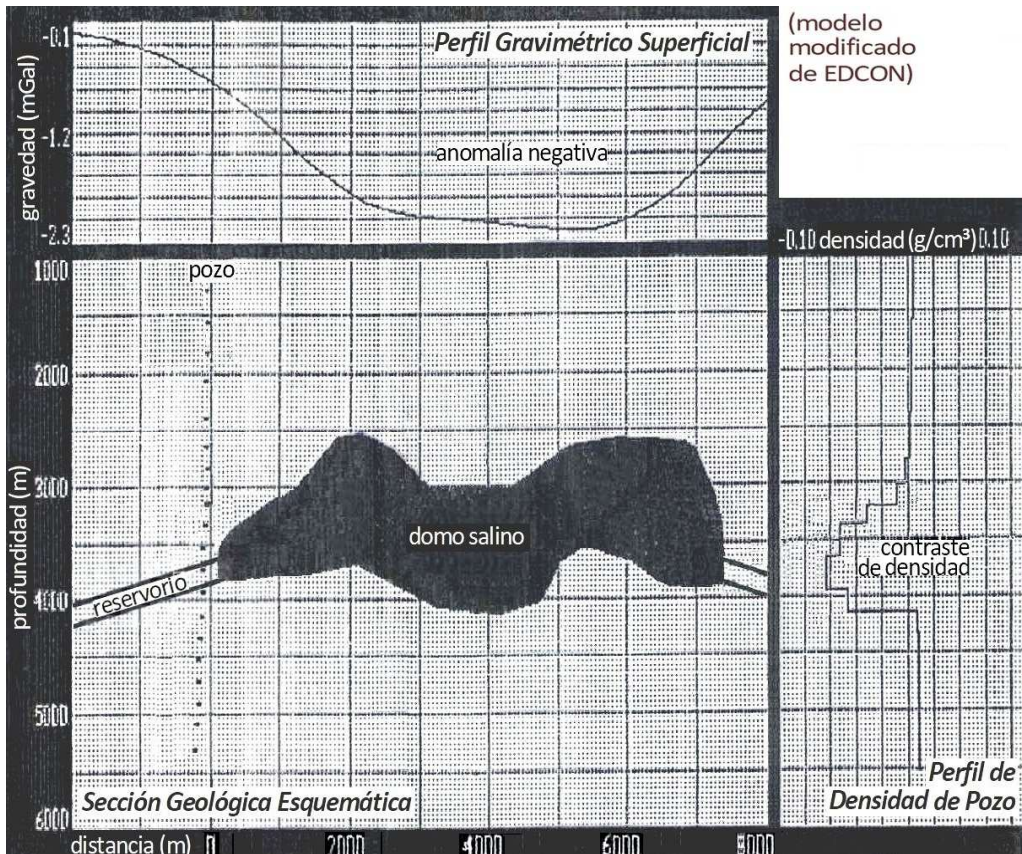
Uno de los 3 acelerómetros y el giróscopo del microgravímetro de pozo MEMS KaiTuo



Herramienta de pozo que contiene el gravímetro MEMS Silicon MicroGravity

(imágenes modificadas de edcon-prj.com; silicong.com, y en.ktjmyq.com)

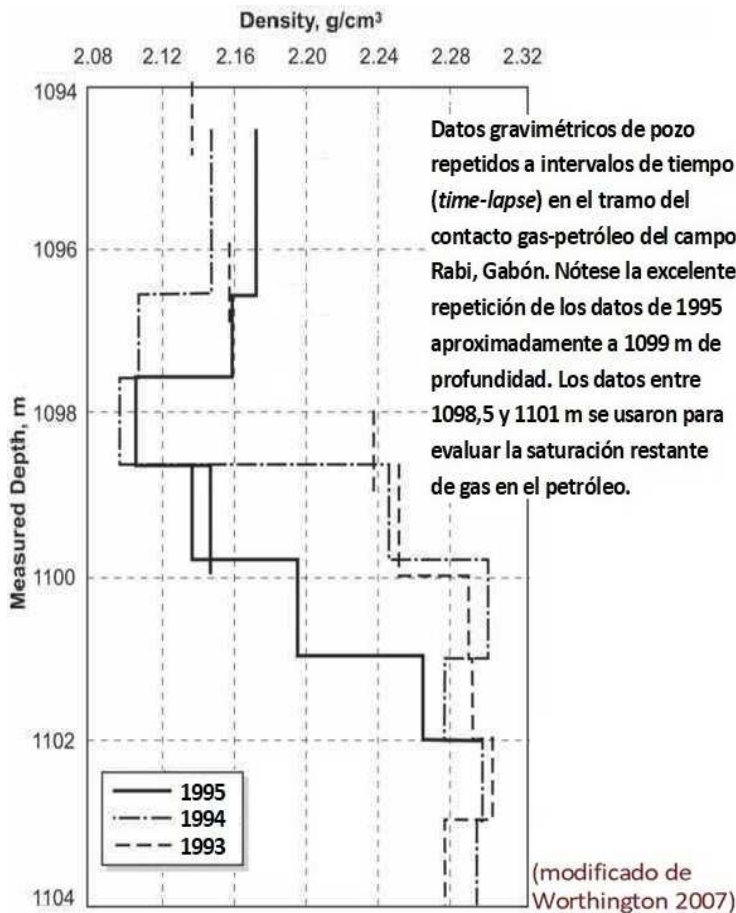
Los gravímetros de pozo pueden proveer información de interés ya sea para explorar o desarrollar yacimientos. Pueden emplearse en pozos dirigidos, incluso horizontales, y *son de gran utilidad en las cuencas con presencia de rocas de densidades muy contrastantes, las cuales pueden ser detectadas a gran distancia lateral de la pared del pozo, algo que no puede lograr el clásico perfil radiactivo de densidad* (en el Tema 09). O sea que su registro es sensible a rocas de diferente densidad cercanas al pozo aunque éste no las haya atravesado, algo útil, por ejemplo, para estimar la distancia lateral hasta la roca sello de una trampa, *caso típico de los domos salinos*



(modelo modificado de EDCON)

que tienen una baja densidad relativa). O también cuando hay intrusiones ígneas (alta δ) capaces de oficiar como sello o bien como reservorio, según si han sido fisuradas o no por la tectónica posterior a su emplazamiento y enfriamiento.

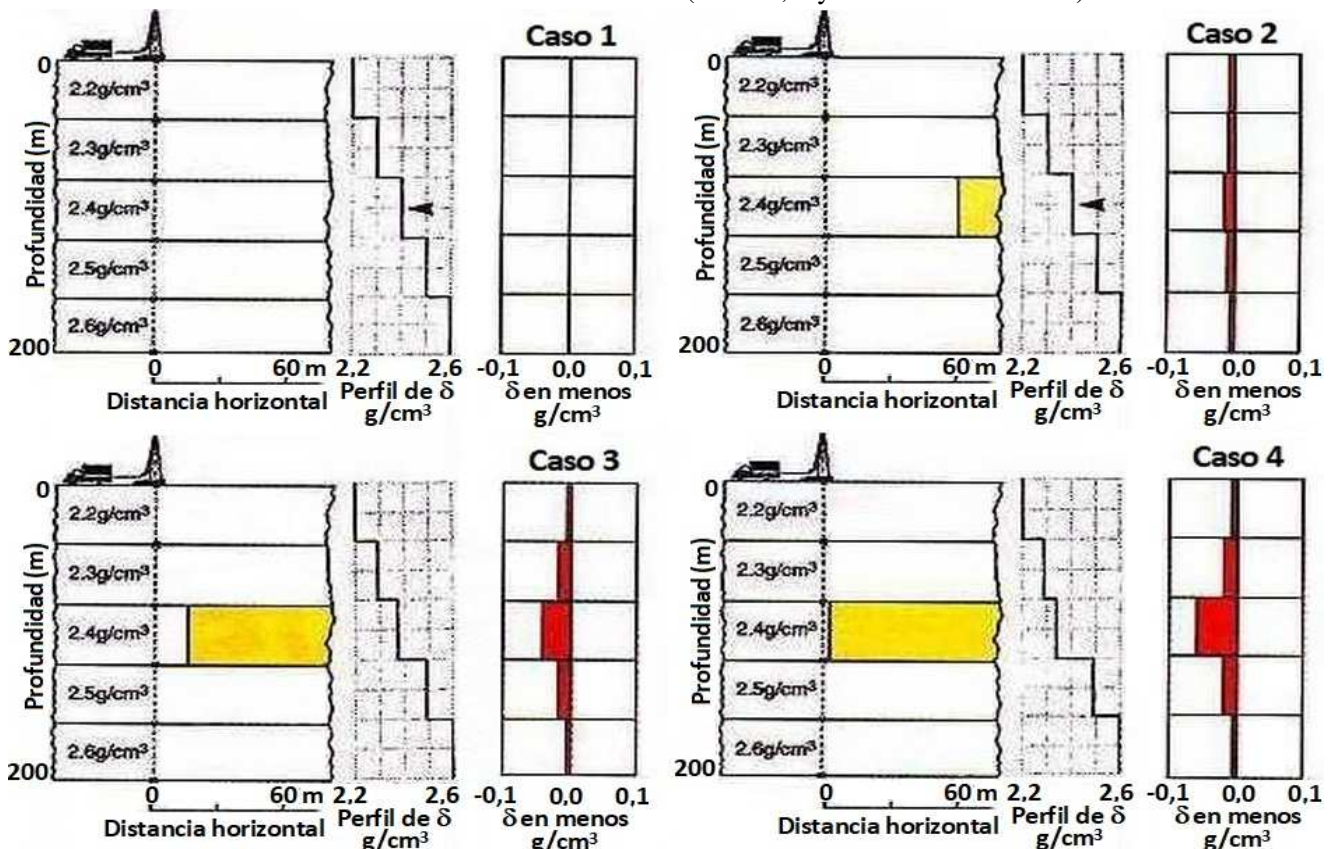
A la izquierda se presenta un modelo comparativo de un perfil de gravimetría superficial con el perfil de densidad resultante de un registro obtenido de un sondeo perforado cerca del diapiro, que se esquematiza en oscuro, contra el cual termina el reservorio de interés.



A la izquierda, cotejo de tres registros hechos en años sucesivos (*time-lapse*, a intervalos de tiempo) en un pozo de Gabón (sur del golfo de Guinea). En este caso la *variación de densidades se debe al descenso del contacto gas/petróleo y la disminución de petróleo residual causada por la explotación del reservorio.*

Con datos muy finos también puede repetirse el mapeo desde la superficie para identificar aquellos sectores ya drenados a partir de la observación de este tipo de cambio de g, pero en este caso se tendrán respuestas apreciables sólo si el reservorio está a poca profundidad, es potente y tiene alta porosidad efectiva. Por ejemplo, en un modelado de inyección de CO₂ (secuestrado de la atmósfera con finalidades ambientales y eventualmente industriales) en un reservorio de agua salada de 20 m de espesor a 1900 m de profundidad, un frente de 30% de saturación de CO₂ y 70% de agua genera una anomalía de -10 μ Gal (muy sutil) en la superficie respecto a la que puede ser medida antes de la inyección (Gasperikova & Hoversten, 2008).

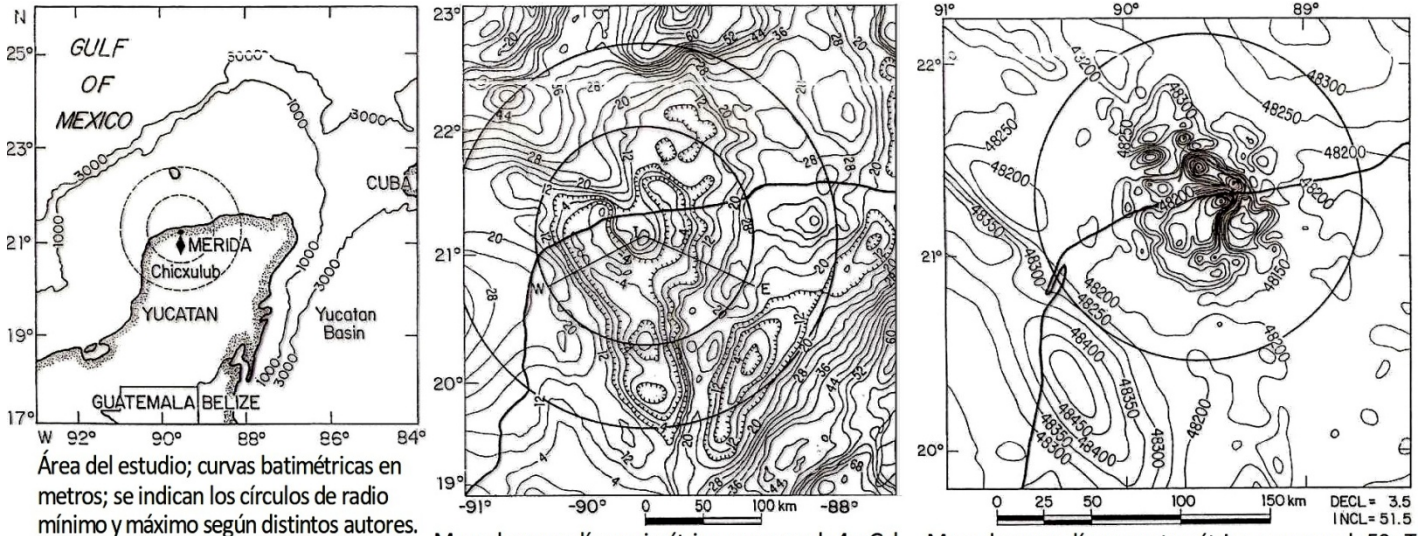
La gráfica desplegada abajo muestra los registros gravitatorios modelados de la caída de densidad en perfil, que ocurre en respuesta a la presencia de un emplazamiento lateral evaporítico inexistente (caso 1) y existente a diferentes distancias de la pared del pozo (casos 2, 3 y 4 en orden creciente).



(gráficos modificados de David Chapin & Marc Anders)

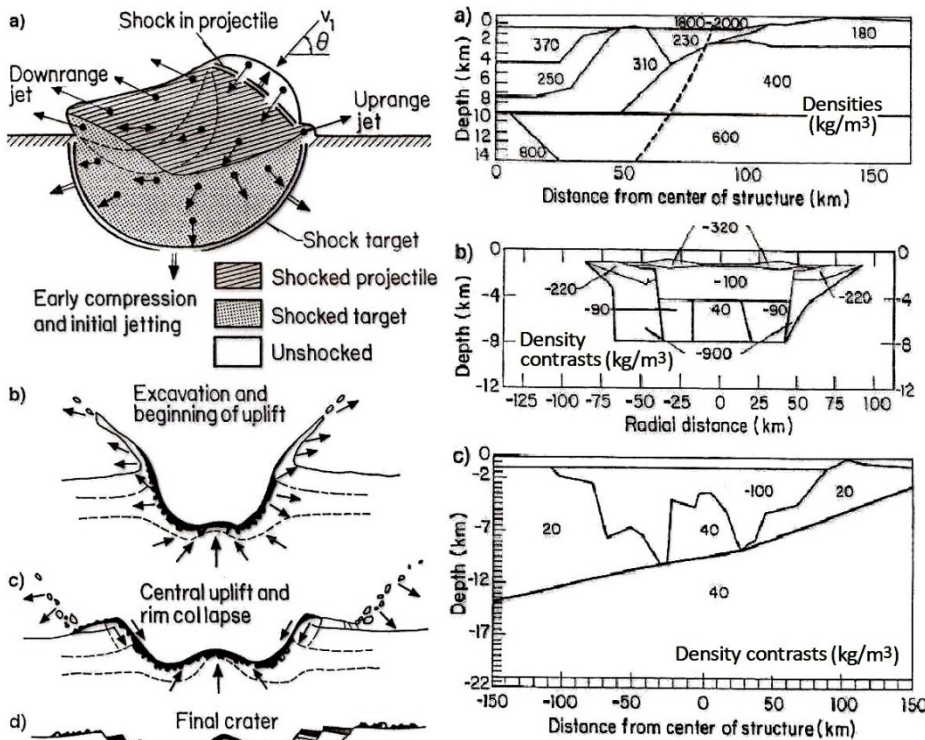
Bonus

Como yapa, una investigación surgida a partir de la interpretación de datos de exploración petrolera en la zona de Chicxulub (en maya, pulga del diablo), poblado de la costa yucateca del golfo de México.



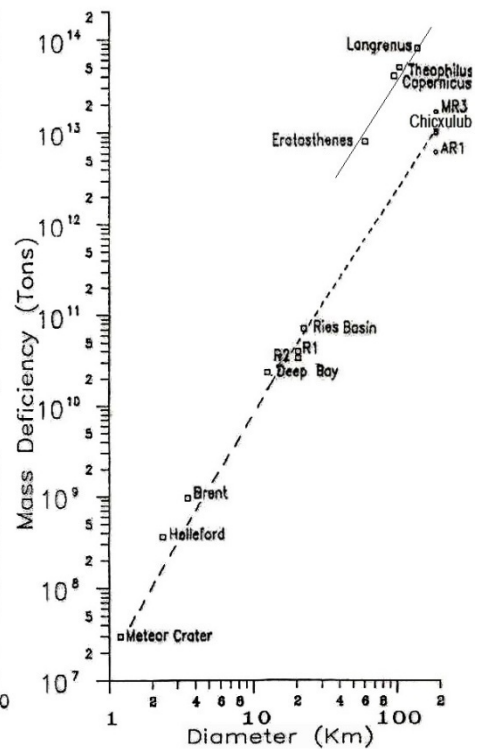
Mapa de anomalía gravimétrica, curvas cada 4 mGal. Mapa de anomalía magnetométrica, curvas cada 50 nT (modificado de Campos-Henríquez et al., 1998)

Podemos ver a continuación en el centro tres modelos alternativos propuestos para explicar la anomalía de unos 180 km de diámetro (representada en los mapas precedentes) detectable con gravimetría, magnetometría y otros métodos, descubierta inicialmente por Antonio Camargo y Glen Penfield de Pemex.



Secciones modeladas de la estructura de impacto según Sharpton et al., 1993 (a), Pilkington et al., 1994 (b) y Espindola et al., 1995 (c).

(modificado de Campos-Henríquez et al., 1998)



Deficiencia de masa de varios cráteres de impacto terrestres y lunares (recta arriba desplazada).

Todos interpretan un cráter provocado por el impacto de un asteroide de unos 10 km de diámetro en aguas marinas someras, que desprendió una gigantesca nube de polvo, cenizas y vapor. En el centro a la derecha se grafica la cantidad estimada de material arrancado, que se coteja con otros cráteres terrestres y cuatro de la Luna

(estos últimos dan un alineamiento desplazado hacia arriba porque la densidad media selenita es de $3,3 \text{ g/cm}^3$, la aceleración de la gravedad allí es de sólo $1,62 \text{ m/s}^2$ y la polvareda resulta mucho mayor).

Se sabe que habría sido este suceso la causa de que en afloramientos de todo el mundo exista una delgada capa con alta concentración de iridio (metal raro en la Tierra pero frecuente en los meteoritos) hallada por primera vez en 1979 en la garganta del Bottaccione (Umbría, Italia). También habría provocado incendios, lluvia ácida, efecto invernadero, una pantalla de polvo que afectó la fotosíntesis global y uno o varios megatsunamis por la onda sísmica de choque haciendo retumbar el planeta. Más dantesco que el infierno del Dante.

La edad: el límite Cretácico-Terciario, hace unos 66 millones de años.

La consecuencia (según el estadounidense **Walter Álvarez** y otros): una masiva extinción de fauna y flora que liquidó a los dinosaurios (muchos ya con plumas), salvo sus versiones voladoras que llamamos aves, y permitió así que unos pequeños mamíferos supervivientes del

apocalipsis, de golpe se encontraran con bocha de campo libre y aceleraran la diversificación evolutiva que, entre tantísimas otras familias, dio lugar a los simios. Y entre éstos, a su vez, una especie ultradepredadora que, tras extinguir los demás integrantes de su propio género y buena parte de la megafauna pleistocénica, hoy ya ha destruido más de un tercio de la biodiversidad y sigue avanzando hacia una nueva extinción en masa. Por egoísta voluntad de tantos poderosos cuyos interesados políticos son votados por mayorías miopes.

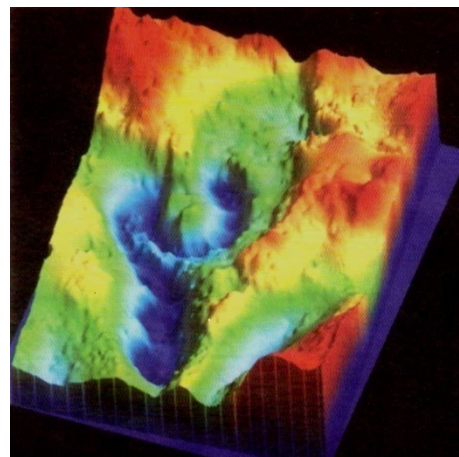


Imagen 3D realizada de la anomalía gravimétrica. (modific. del Geological Survey de Canadá)

CUESTIONARIO BÁSICO

- Señalar instrumental antiguo y principalmente moderno usado para mediciones absolutas.
- ¿Qué tipos de gravímetros de resorte existen y en qué ámbitos se los puede utilizar?
- ¿Qué es la constante de un gravímetro de muelle y cómo se procede al medir?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los gradiómetros?
- ¿Qué opciones existen para registrar en vuelo y cómo influyen la altura, velocidad y clima?
- ¿Qué tipo de información brindan los gravímetros de pozo?
- Dar ejemplos de aplicaciones de la gravimetría, a escalas cortical, cuencal y local.
- ¿Qué utilidad pueden tener las mediciones microgravimétricas?
- ¿Qué informaciones provee la gravimetría en la prospección petrolera?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 317-388). Prentice-Hall.
- Campos-Henríquez, J., Morales-Rodríguez, H., Domínguez-Méndez, F. & Birch, F., 1998. Gauss theorem, mass deficiency at Chicxulub crater (Yucatán, México) and the extinction of dinosaurs. Geophysics, V.63 N°5 (p 1585-1594).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 35-100). Librería de Ciencia e Industria.
- Chapin, D., 1996. A deterministic approach toward isostatic gravity residuals; a case study from South America. Geophysics, V.61 N°4 (p 1022-1033).
- Chapin, D., 1998. Gravity instruments: past, present, future. The Leading Edge, V.17 N°1 (p 100-112).
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 357-475). McGraw-Hill.
- Dransfield, M., 2007. Airborne gravity gradiometry in the search for mineral deposits. Proceedings of Exploration 07: 5th Decennial International Conference on Mineral Exploration (p341-354). B. Milkereit.
- Gasperikova, E. & Hoversten, G., 2008. Gravity monitoring of CO₂ movement during sequestration: model studies. Geophysics, V.73 N°6 (p 105-112).
- Griffiths, D. & King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p148-179). Editorial Paraninfo.

- Howarth, R., 2007. Gravity surveying in early geophysics. *Earth Sciences History*, V.26 N°2 (Part I p 201-228; part II p229-261).
- Introcaso, A., Pacino, M. & Fraga, H., 1990. Gravedad, isostasia y acortamiento cortical andino entre las latitudes 30°S y 35°S. XI Congreso Geológico Argentino, Actas I (p 251-254).
- Kane, M. & Godson R., 1985. Features of a pair of long-wavelength (>250 km) and short-wavelength (<250 km) Bouguer anomaly maps of the United States. En *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps* (p 45-61), Hinze, W. & associate Eds. Society of Exploration Geophysicists.
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 214-264). Ediciones Omega.
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of geophysics* (p 29-81). Cambridge University Press.
- McLean, M., Damaske, D., Damm, V. & Reitmayr, G., 2004. Airborne gravity data acquisition and processing: a case study in the Prince Charles Mountains, East Antarctica. ASEG-PESA, Abstracts18 (p 99-110).
- Mon, R., Pomposiello, M. & Díaz, T., 1990. Estructura de la cuenca de Tucumán de acuerdo a investigaciones gravimétricas. XI Congreso Geológico Argentino, Actas I (p 247-250).
- Morgan, L., 2012. Geophysical characteristics of volcanogenic massive sulfide deposits in massive sulfide occurrence model. U.S.Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-C, chap.7 (16 p).
- Nettleton, L., 1976. *Gravity and magnetics in oil prospecting* (p 1-304). McGraw-Hill.
- Pajot-Métivier, G., 2007. Caractérisation, analyse et interpretation des données de gradiométrie en gravimétrie (181 p). Géophysique, Institut de physique di globe de Paris.
- Parasnis, D., 1971. *Geofísica minera* (p 227 -281). Editorial Paraninfo.
- Pawlowski, B., 1998. Gravity gradiometry in resource exploration. *The Leading Edge*, V.17 N°1 (p 51-52).
- Pomposiello, C., Corbella, H., Alonso, S., Chelotti, L. & Trincherro, E., 1991: Gravimetric and seismic studies, Magallanes Maar, Extrandean Patagonia, Argentina. Congreso Brasileiro de Geofísica, Actas (p 413-417).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. *Basic exploration geophysics* (p 221-331). John Wiley & Sons.
- Sharma, P., 1976. *Geophysical methods in geology* (p 146-157). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R.,1991. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. *Applied geophysics* (p 7-104, 803). Cambridge University Press.
- Udías, A. & Mezcuca, J., 1997. *Fundamentos de geofísica* (p37-139). Alianza Editorial.
- Vasilevskiy, A. & Dashevsky, Y., 2015. Gravity monitoring at oil and gas fields: data inversion and errors. *Russian Geology and Geophysics*, V.56 N°5 (p 762-772).
- Wang, L., Kaban, M., Thomas, M., Chen, C. & Ma, X., 2019. The challenge of spatial resolutions for GRACE-based estimates volume changes of larger man-made lake: the case of China's Three Gorges Reservoir in the Yangtze River. *Remote Sensing*, V.11 N°99 (19 p).
- Worthington, P., 2007. Specialized well logging topics. En *Petroleum Engineering Handbook*, V 5 (p 379-420). Society of Petroleum Engineers.
- Yule, D., Sharp, S. & Butler, D., 1998. Microgravity investigation of foundation conditions. *Geophysics*, V.63 N°1 (p 95-103).
- Zumerge, M., Ridgway, J. & Hildebrand, J., 1997. A towed marine gravity meter for near-bottom surveys. *Geophysics*, V.62 N°5 (p 1386-1393).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.