



513335 Geofísica de la Tierra Sólida

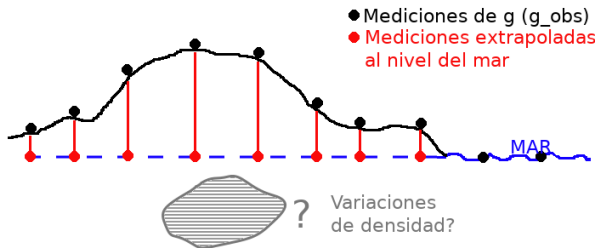
Presentación 8

Anomalías de Gravedad

Versión 1.1

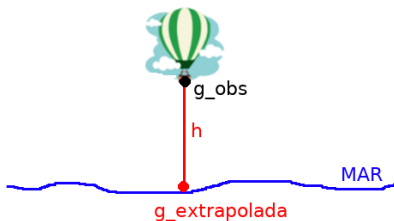


Mediciones de gravedad y anomalías



- ▶ La figura muestra que observaciones de gravedad, g_{obs} , tomadas en la superficie terrestre están a diferentes elevaciones (puntos negros).
- ▶ Se puede extrapolar estas mediciones a su valor en una superficie de referencia, frecuentemente el nivel del mar (puntos rojos).
- ▶ Si existe una diferencia entre las mediciones extrapoladas y un modelo de referencia, $g_0(\lambda)$, tenemos anomalías de gravedad y existen variaciones laterales en la densidad dentro de la Tierra (debajo del nivel de referencia).
- ▶ Noten que el nivel del mar no siempre tiene que estar el nivel de referencia, pero para simplicidad en esta presentación lo tomaremos así.

Corrección del aire libre

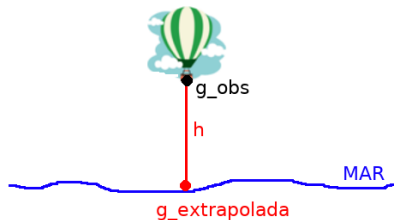


La corrección del aire libre supone que la medición esta tomada a una altura h encima del nivel de referencia (en este caso el nivel del mar), pero que el observador está “flotando” en el aire libre. Dado que g es proporcional al r^{-2}

$$g(h) = g_{n.m.} \left(\frac{r}{r+h} \right)^2 = g_{n.m.} \left(\frac{1}{1+h/r} \right)^2 \simeq g_{n.m.} \left(1 - \frac{2h}{r} \right) \quad (1)$$

donde $g_{n.m.}$ es el valor de gravedad al nivel del mar, r es el radio terrestre y h es la distancia para corregir. En el último paso de la ecuación (1) hemos usado una aproximación binomial.

Corrección del aire libre



Entonces, la corrección del aire libre, dg_{FA} es

$$dg_{FA} = \frac{-2hg_{n.m.}}{r} \simeq -0.3086h \times 10^{-5} \text{ [ms}^{-2}\text{]} \quad (2)$$

donde h tiene unidades de metros.

La precisión de un gravímetro típico usado en el campo es aproximadamente $0.01 \times 10^{-5} \text{ [ms}^{-2}\text{]}$.

Anomalía del aire libre

La definición de la anomalía del aire libre, Δg_{FA} , es:

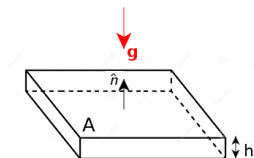
$$\Delta g_{FA} = g_{obs} - dg_{FA} - g_0(\lambda) \quad (3)$$

- g_{obs} es el valor observado a una altura h .
- dg_{FA} es la corrección del aire libre.
- $g_0(\lambda)$ es el valor de referencia.

$$\begin{aligned} \Delta g_{FA} &= g_{obs} + \frac{2hg_{n.m.}}{r} - g_0(\lambda) \\ &\simeq g_{obs} + 0.3086h \times 10^{-5} - g_0(\lambda) \end{aligned} \quad (4)$$

Noten que para corregir la observación al nivel del mar, hay que aumentar el valor de la observación. Esta corrección acerca la observación al centro de masa de la Tierra, entonces el valor de g al nivel del mar es mayor que lo que se mide a una distancia mayor.

Corrección de Bouguer



¿Cuál es la atracción gravitacional de una lámina infinita de masa? Para calcularla, podemos usar la siguiente ecuación (¿Cómo se llama?):

$$\oint_S \vec{g} \cdot d\vec{A} = -4\pi GM_{\text{encerrada}} \quad (5)$$

Si la lámina es infinita, solo tenemos que considerar las dos superficies de arriba y abajo, en las cuales $\vec{g} \cdot d\vec{A} = -Ag$. La masa de la lámina es su volumen multiplicado por su densidad.

$$-2Ag = -4\pi G(Ah\rho) \quad (6)$$

Y entonces la atracción gravitacional de esta lámina es

$$g = 2\pi G\rho h \quad (7)$$

Corrección de Bouguer



La corrección de Bouguer, dg_B ajusta por la masa adicional entre el punto de observación y el nivel del mar. Como aproximación, se supone que la masa adicional es como una lámina infinita de masa. Esta aproximación funciona cuando la medición esta en una pendiente no tan inclinada, si no hay que poner una corrección adicional del terreno.

$$dg_B = 2\pi G\rho h \quad (8)$$

Aquí, la densidad ρ es el promedio de la densidad de la roca entre el punto de observación y el nivel del mar.

Anomalía de Bouguer

La anomalía de Bouguer, Δg_B , incluye ambas correcciones del aire libre y de Bouguer

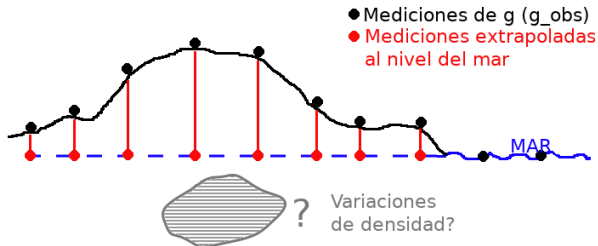
$$\Delta g_B = \underbrace{g_{\text{obs}} - dg_{\text{FA}} - dg_B}_{\text{observación corregida}} - g_0(\lambda) \quad (9)$$

Aquí, la observación ha sido corregido al nivel de referencia, tomando en cuenta la elevación encima el nivel del referencia y además la masa adicional entre el nivel de referencia y el punto de observación.

$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} + \frac{2hg_{\text{n.m.}}}{r} - 2\pi G\rho h - g_0(\lambda) \quad (10)$$

Noten que para corregir la observación por la masa adicional, hay que reducir el valor de la observación. La masa adicional da una fuerza atractiva entonces sin este efecto el valor de g sería reducida.

Las anomalías del aire libre y de Bouguer



Sin variaciones laterales de densidad en la corteza:

- ▶ Δg_B debería estar cero (observación corregida \equiv valor referencial).
- ▶ Δg_{FA} debería estar positivo (todavía hay el efecto de la masa adicional para corregir).

Gravedad observada y gravedad de referencia

Gravedad observada \equiv gravedad de referencia *más*

1. el efecto de elevación sobre el nivel del mar / nivel referencial (dg_{FA}).
2. el efecto de la atracción "normal" de masa adicional entre el punto de observación y el nivel del mar / nivel referencial (dg_B).
3. variaciones laterales en la densidad de la corteza / el manto superior (anomalías).
4. el cambio en la forma de la Tierra con la órbita de la Luna (mareas terrestres).
5. una corrección para una medición en un punto de observación moviéndose (satélites)
6. el efecto de doblamiento de placas que soportan cargas topográficas (isostasia).

Los efectos 4 y 5 pueden estar corregidas sin dificultad. En esta sección enfocamos en el efecto 6, el doblamiento de placas e isostasia.

El principio de isostasia

- ▶ La corrección de Bouguer corrige por la atracción de la masa adicional encima un cierto nivel de referencia.
- ▶ Pero ... ¿Qué pasa si la carga adicional ya ha sido corregida por la reorganización de la placa encima de la astenosfera?
- ▶ Esto nos lleva al principio de isostasia.

Principio de Isostasia

La masa en cualquier columna de la litosfera es constante, hasta un radio de referencia (debajo del cual no hay mas variaciones laterales de densidad).

¿Cómo se define litosfera y astenosfera?

Isostasia de Airy

Aplicando el principio de isostasia a las columnas 1 y 2

$$t\rho_u + r_1\rho_s = (h_1 + t + r_1)\rho_u$$

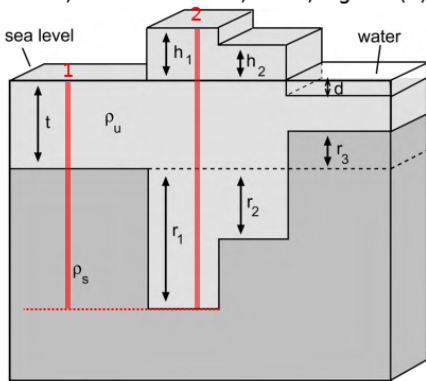
Entonces,

$$r_1\rho_s = h_1\rho_u + r_1\rho_u$$

Y resolviendo para r_1 :

$$r_1 = h_1 \left(\frac{\rho_u}{\rho_s - \rho_u} \right)$$

Fowler, The Solid Earth, 2 Ed., Fig. 5.6(a)

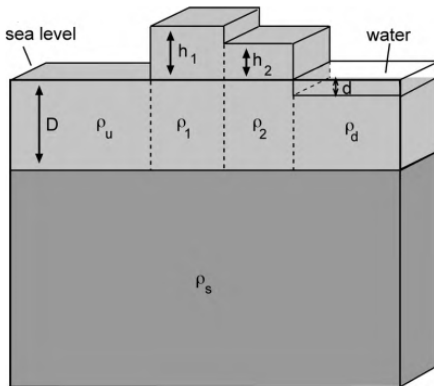


Cargas topográficas están compensadas por una raíz de compensación.

¿Pueden pensar en un ejemplo real de la isostasia de Airy en la Tierra?

Isostasia de Pratt

Fowler, The Solid Earth, 2 Ed., Fig. 5.6(b)



Aplicando el principio de isostasia a las columnas

$$\rho_1 < \rho_2 < \rho_u < \rho_d$$

Lugares elevados están compensados por una baja densidad.

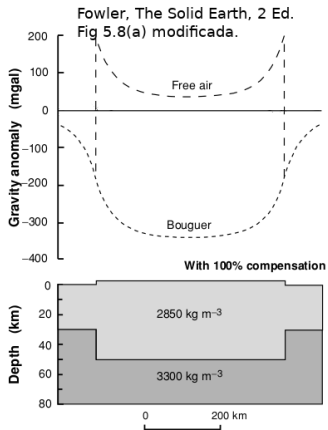
¿Pueden pensar en un ejemplo real de la isostasia de Pratt en la Tierra?

Correlación entre anomalías de gravedad y cargas topográficas

La correlación entre las anomalías de Bouguer y del aire libre contiene información sobre hasta qué nivel la topografía esta isostáticamente compensada.

Si hay 100% compensación, la carga topográfica ya esta compensada entonces tendremos:

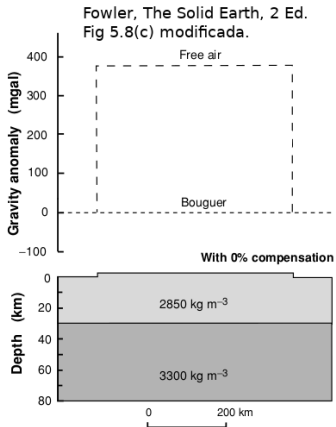
- anomalía negativa de Bouguer.
- anomalía del aire libre ~ 0 .



Correlación entre anomalías de gravedad y cargas topográficas

Si hay 0% compensación,
la carga topográfica no esta compensada
entonces tendremos:

- anomalía de Bouguer ~ 0 .
- anomalía del aire libre positiva.

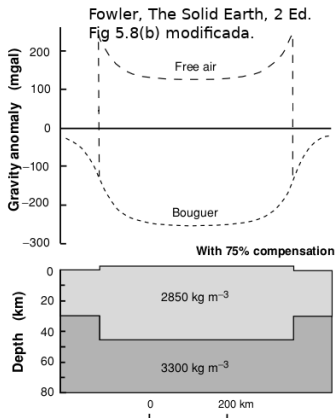


En estas figuras, la anomalía de gravedad esta dada en mgal.
 $1 \text{ [mgal]} = 1 \times 10^{-3} \text{ [gal]} = 1 \times 10^{-3} \text{ [cm/s}^2\text{]} = 1 \times 10^{-5} \text{ [m/s}^2\text{]}.$

Correlación entre anomalías de gravedad y cargas topográficas

Si hay 75% compensación, la carga topográfica esta parcialmente compensada entonces tendremos:

- anomalía negativa de Bouguer.
- anomalía del aire libre positiva.

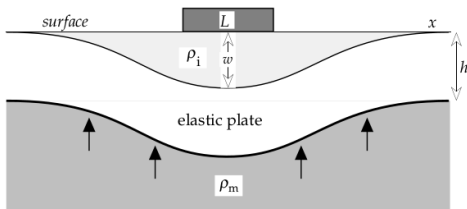


¿Si esta carga topográfica esta 75% compensada, en qué dirección debería moverse para obtener 100% compensación?

La flexión de la litosfera

Para tener la flexión de una placa se requiere que las dimensiones de la carga topográfica están aproximadamente similares al espesor de la placa. Entonces cargas espacialmente grandes pueden estar compensadas isostáticamente. (En mayor detalle, depende del espesor elástico de la placa y se considere en los apuntes del curso en ecuaciones (2.78) a (2.83) pero no les voy a examinar).

Una carga topográfica con dimensiones pequeñas causará un campo de esfuerzos bastante esférica en la placa y entonces la placa no doblará. En este caso la carga no está compensada.



Lowrie, Fundamentals of Geophysics, 2 Ed. Fig. 2.75(a)

Ejemplo - cráteres

Cráteres suficientemente pequeñas no están compensadas. Entonces, el cráter, lleno con sedimentos que tienen menor densidad que la corteza alrededor, tendrá una anomalía de Bouguer negativa.



Observaciones de gravedad encima la posición del cráter, g_{obs} , corregidas al nivel de referencia, serán menores que el valor referencial de g en el punto.

$$\underbrace{g_{\text{obs}} - dg_{\text{FA}} - dg_{\text{B}}}_{\text{observación corregida}} < g_0(\lambda)$$

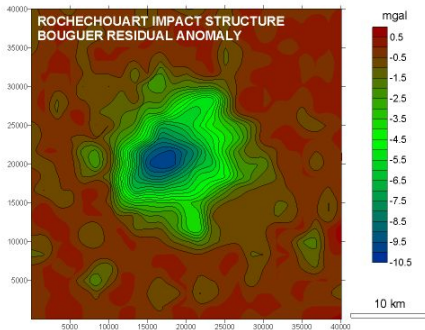
$$\therefore \Delta g_{\text{B}} = g_{\text{obs}} - dg_{\text{FA}} - dg_{\text{B}} - g_0(\lambda) < 0$$

En este caso, se puede aproximar la capa de sedimentos en el cráter como una lámina de masa (diapositiva 6) para estimar la profundidad d del cráter en su centro.

$$\Delta g_{\text{B}}|_{\text{en el centro}} = 2\pi G(\rho_{\text{sedimentos}} - \rho_{\text{corteza}})d \quad (11)$$

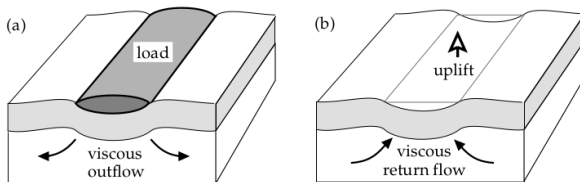
Ejemplo - cráteres

La figura muestra la anomalía de Bouguer medida por la estructura de impacto en Rochechouart (Francia). El cráter inicial ha sido rellenado por la erosión y no hay ningún cráter visible hoy en día, entonces la manera de investigar este impacto es a través de mediciones de gravedad. Estimen el radio del cráter.



Fuente: http://estructuras-de-impacto.impact-structures.com/?page_id=1413

Ejemplo - rebote post-glacial



Lowrie, Fundamentals of Geophysics, 2 Ed. Fig. 2.80

- ▶ La figura (a) muestra la flexión de la placa debido a una carga de un campo de hielo grande.
- ▶ Cuando termina la glaciación el hielo desaparece rápidamente, comparado con la velocidad del flujo viscoso en la astenosfera.
- ▶ La figura (b) muestra el flujo en la astenosfera y la subida de la superficie cuando desaparece la carga de hielo.
- ▶ Hoy en día, estamos en una etapa de rebote post-glacial en lugares como Canadá, Escandinavia y Patagonia.
- ▶ La tasa del rebote (del orden de ~ 1 cm por año) nos entrega información sobre la viscosidad de la astenosfera.

Lectura adicional

- ▶ Apuntes del curso, Capítulo 2. Secciones 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.
- ▶ Página web que explica “uplift and erosion”.
- ▶ Documento sobre mediciones de gravedad de algunas estructuras de impacto.
- ▶ Fowler, The Solid Earth, 2^o Ed. Sección 5.5 “Gravity anomalies”

Preguntas prácticas

1) Fowler - The Solid Earth (Second Edition). Capítulo 5 p. 229. **Pregunta 14**
“A mountain range 4 km high is in isostatic equilibrium ...”.

2) [Pregunta Computacional] Los cráteres de meteoritos se llenan con sedimentos después de un tiempo. La figura muestra un ejemplo de un cráter cerca de la costa lleno con sedimentos tipo arena. Además, los mismos sedimentos modifican la topografía en la zona.



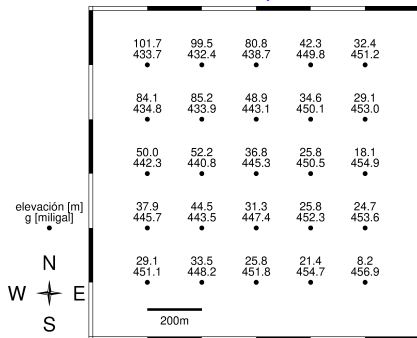
Un cráter en roca madre, lleno con sedimentos menos denso (representación 2D).

(a) El mapa en la siguiente página muestra mediciones de gravedad tomadas en un área donde se piensan que hubo un impacto de un meteorito hace mucho tiempo. Calcule la anomalía de Bouguer en cada punto usando las siguientes datos: $1 \text{ miligal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$; densidad de los sedimentos = 1650 kgm^{-3} ; $g_{\text{ref}}|_{\text{nivel del mar}} = 979459.2 \text{ mgal}$. Señale la ubicación del cráter.

Use las anomalías calculadas para estimar la ubicación del centro del cráter y su radio.

Preguntas prácticas

(b) Explique por qué la anomalía que se calcula es negativa. Además, use el valor de la anomalía en el centro del cráter para estimar su profundidad. (Use densidad de la roca madre = 2650 kgm^{-3} y considere la anomalía generada por una lámina infinita de masa para simplicidad).



El primer número es la elevación en metros y el segundo es la gravedad en unidades de miligal (noten que hay que sumar 979000 miligales en cada punto para obtener valores de g absolutos).

Preguntas prácticas

Antes de intentar la siguiente pregunta por favor leer Fowler - The Solid Earth (Second Edition). Sección 5.5.5 "Gravity anomalies due to some buried bodies" pp. 211-213.

3. [Pregunta Computacional] (a) Dos esferas idénticas están enterradas en la Tierra a la misma profundidad. Sus densidades están la mitad del material que esta alrededor. Calcule las anomalías en la superficie y muestre lo que pasa cuando las esferas están más cerca entre ellas. También calcule las anomalías que resultan cuando las esferas están movidas verticalmente.

(b) Hable de sus resultados en términos de la no-unicidad de los datos de anomalías de gravedad en la superficie.