

Gravimetria

PROF. DR. VINICIUS LOURO

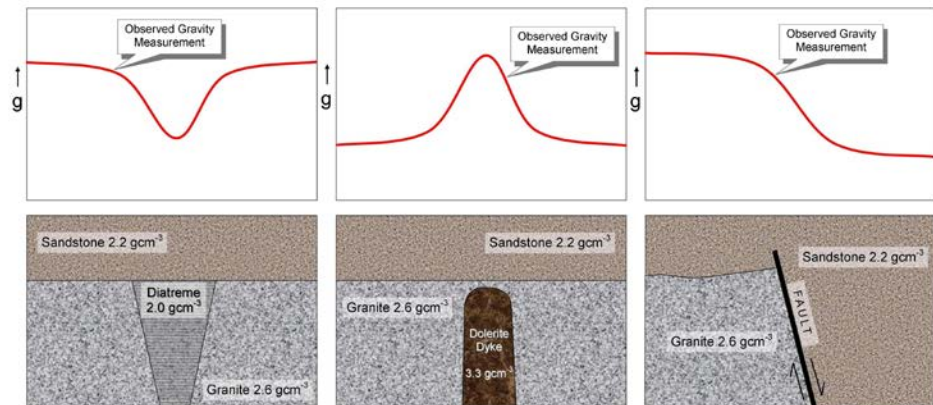
Gravimetria

Investigação de contrastes de densidade

- Baseado em medidas das variações do campo gravimétrico da Terra
- Alcance
 - Até o núcleo da Terra

Aplicações

- Exploração de petróleo
 - e.g. Domos salinos
- Exploração mineral
 - e.g. Caracterização de intrusões
- Tectônica
 - e.g. Delimitação de blocos tectônicos



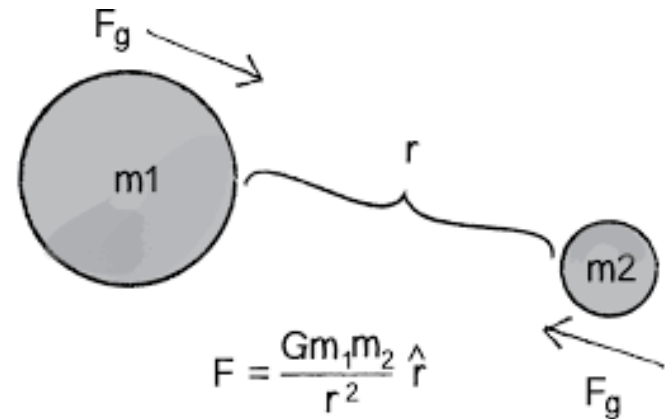
<http://www.geologyforinvestors.com/wp-content/uploads/GravitySurveys.jpg>

Princípios Físicos

3ª lei de Newton

- Atração Universal

$$\vec{F} = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$



- Em que
 - $F \equiv$ força de atração que a massa m_1 exerce em m_2
 - $r \equiv$ distância entre o centro de massa desses corpos

Princípios Físicos

Adaptando ao sistema Terra simplificada

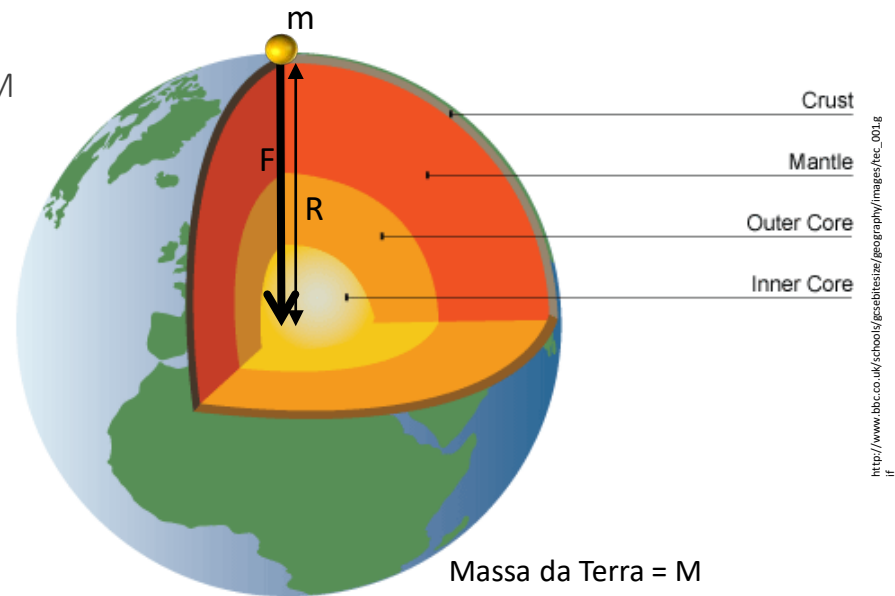
- Assumimos
 - Forma da Terra ≡ esférica
 - Movimentação Estática ≡ Sem efeitos de rotação
 - Raio da Terra ≡ R
 - Massa da Terra ≡ Homogênea de valor M

- Assim

$$\vec{F} = \frac{GMm}{R^2} = m\vec{a}_G$$

- Em que

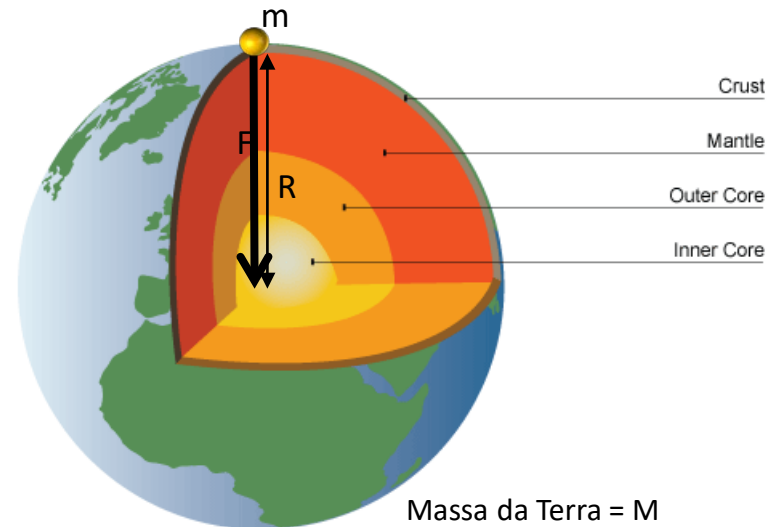
- F ≡ força da gravidade
- M ≡ massa da Terra
- R ≡ raio da Terra
- G ≡ constante de gravitação universal ($6.67408 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
- $a_G \equiv GM/R^2 \equiv$ aceleração da gravidade



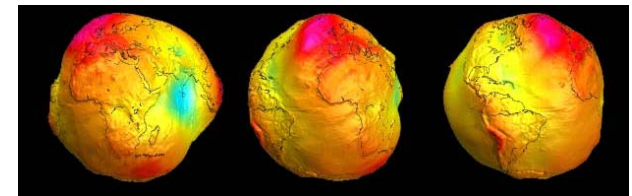
Princípios Físicos

Porém a Terra não é tão simples

- Assumimos
 - Forma da Terra \equiv esférica
 - Quase elipsoidal
 - Movimentação Estática \equiv Sem efeitos de rotação
 - Rotacional
 - Raio da Terra $\equiv R$
 - Topografia irregular
 - Massa da Terra \equiv Homogênea de valor M
 - Heterogênea
- Tudo isso gera variações no campo gravimétrico



http://www.bbc.co.uk/schools/igcse/physics/geography/images/1ec_001.gif



<http://www.spacedaily.com/images/earth-gravitymaps-desk-1024.jpg>

Princípios Físicos

Método Potencial

- Potencial Gravimétrico

- Energia potencial (E_p)

- Força (F) exercida a uma determinada distância (δ_r)

$$E_p = F \cdot \delta r = m \cdot a \cdot \delta r$$

- Quando falamos de potencial gravitacional (U_G)

$$E_p = m \cdot U_G$$

- Então

$$E_p = m \cdot U_G = m \cdot a_G \cdot \delta r$$

- Lembrando que

$$\vec{F} = \frac{GMm}{R^2} = m\vec{a}_G$$

- Temos

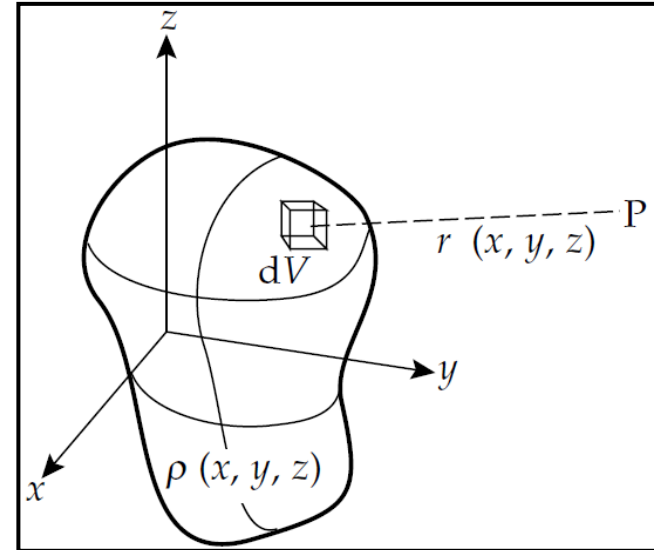
$$U_G = G \frac{M}{R}$$

Princípios Físicos

Propriedade física

- Dado um corpo de densidade $\rho(x,y,z)$
 - Potencial gravitacional (U_G) no ponto $r(x,y,z)$

$$U_G = G \iiint_{x y z} \frac{\rho(x, y, z)}{r(x, y, z)} dx dy dz$$



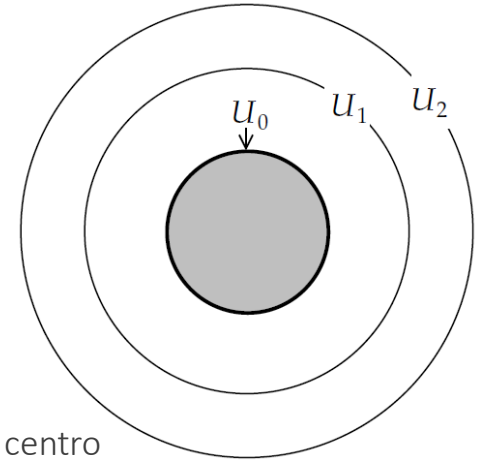
- Para um ponto fora da esfera
 - U_G e a_G serão os mesmos considerando a massa do corpo concentrada em seu centro

$$U_G = G \frac{E}{r} \quad a_G = G \frac{E}{r^2}$$

Princípios Físicos

Superfícies equipotenciais

- Potencial gravitacional
 - Campo vetorial conservativo
 - Superfícies constantes \equiv superfícies equipotenciais.
- Para uma esfera com massa m
 - Potencial gravimétrico varia apenas em função da distância r do seu centro
 - Assim temos superfícies equipotenciais concêntricas à esfera, tal que:
 - Equipotencial u_n dista r_n do centro
 - u_0 coincide com o limite da esfera
 - Energia do trabalho ao longo dessa superfície é zero



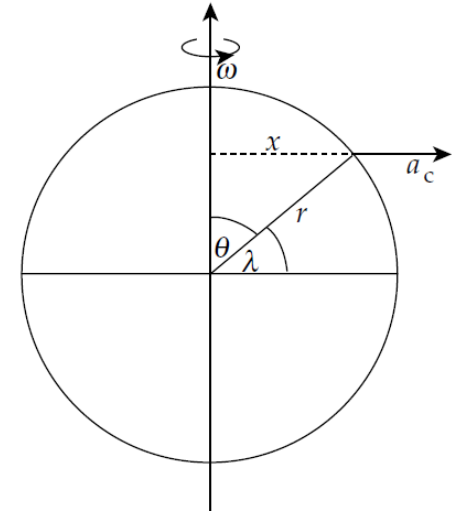
$$d\tau = -F \cdot ds = F(\cos \theta) ds$$

Princípios Físicos

Potencial centrífugo

- Atração gravitacional e do efeito de rotação terrestre
 - A aceleração centrífuga (a_c) é definida em função do eixo de rotação
 - Considere um ponto de rotação na Terra com raio r
 - O ângulo θ entre o raio e o eixo de rotação é chamado de colatitude (complementar a latitude λ)
- O potencial centrífugo é dado por

$$\vec{a}_c = -\frac{\partial U_c}{\partial x} \vec{x} = (w^2 x) \vec{x}$$



Princípios Físicos

Forma da Terra

- O formato da Terra é bem irregular
 - Com uma distribuição de massa heterogênea
 - Influenciando diretamente na gravidade
- Dois modelos terrestres
 - Elipsóidal
 - Geóidal

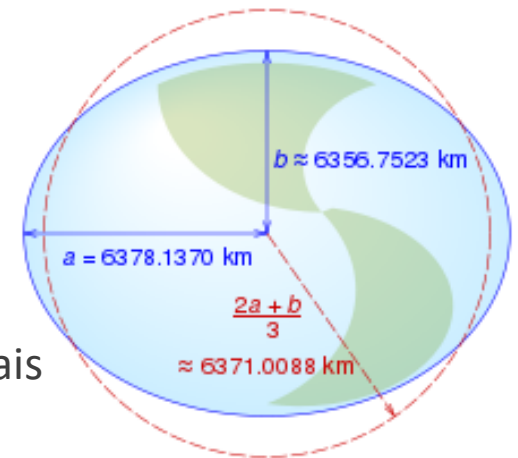
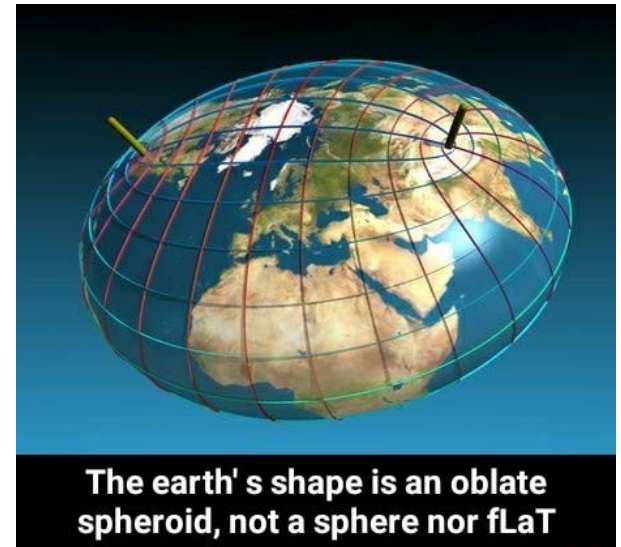
Por que não usar um único modelo para a superfície terrestre?

- A forma real da Terra leva em consideração infinitos parâmetros
 - Matematicamente inviável
- Então utiliza-se dois modelos principais
 - Modelo elipsoidal
 - Geometria para uma distribuição de massas homogênea
 - Modelo geoidal
 - Incorpora as deformações geométricas decorrentes da distribuição heterogênea da massa

Princípios Físicos

Modelo elipsoidal ou Terra Normal:

- Constituído por um elipsóide de revolução
 - Distribuição homogênea de massa
- **Forma Geométrica**
 - Que melhor se aproxima da forma real da Terra
- **Uso**
 - Cálculos de posicionamento geodésico
- **Entretanto**
 - Por não ter a mesma distribuição das massas da Terra real
 - Inadequado para representar a massa terrestre em equilíbrio
- **Calculado com base em observações de satélites artificiais**
 - Elipsóide que melhor ajusta o formato da Terra
 - International Reference Ellipsoid



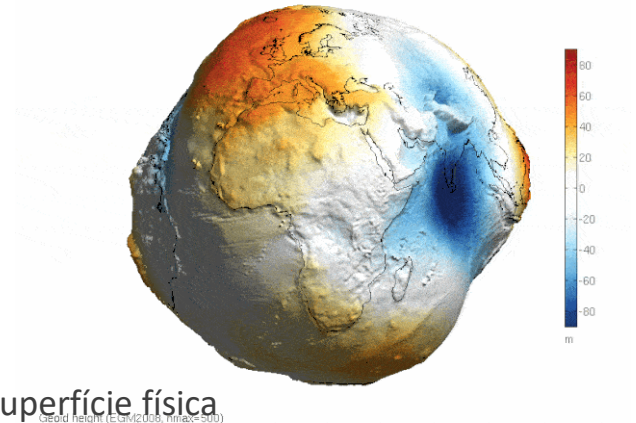
Princípios Físicos

O modelo geoidal

- É o modelo terrestre que mais se aproxima da forma real da Terra
- Definição de superfície geoidal

“Superfície quiipotencial do campo da gravidade que coincide com o nível médio dos mares não perturbados e, imaginariamente se prolonga pelos continentes”

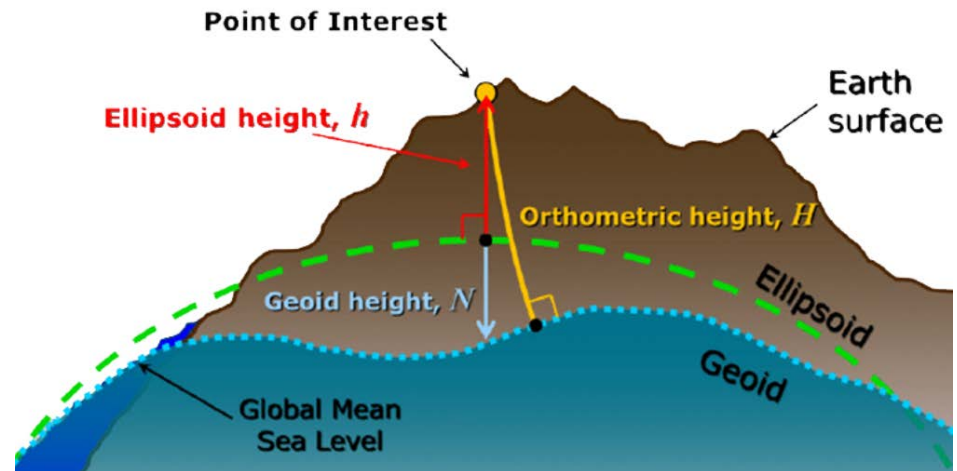
- Incorpora as deformações geométricas
 - Associadas à distribuição das massas da Terra
 - Inapropriado para o posicionamento geodésico de pontos na superfície física



Princípios Físicos

Modelo geoidal

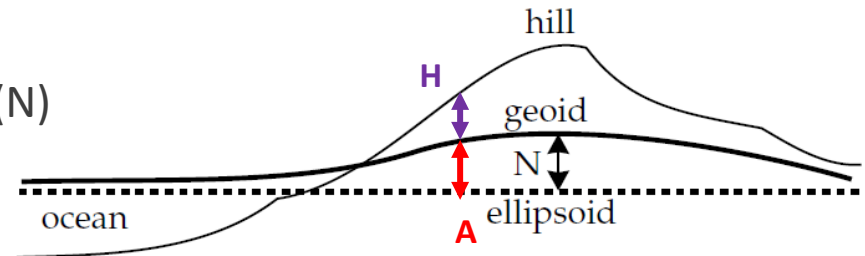
- Sobre os continentes o geóide é afetado pela massa sobre o nível do mar
 - Ex: montanhas, planaltos, etc.
 - Esse excesso de massa gera um aumento na atração da gravidade
- Gera uma elevação local do geóide sobre o elipsóide $H \approx h - N$
- Denominado ondulação geoidal (N)



Princípios Físicos

Convenções

- Altura geoidal (A)
 - Distância sobre a normal entre um ponto do geóide e sua projeção no elipsóide
- Convenção
 - Positivas no exterior e negativas no interior do geóide
- Caracterizam as ondulações geoidais (N)
- Altitude ortométrica (H)
 - Distância na vertical de um ponto na superfície terrestre e o geóide



Princípios Físicos

Gravidade Normal

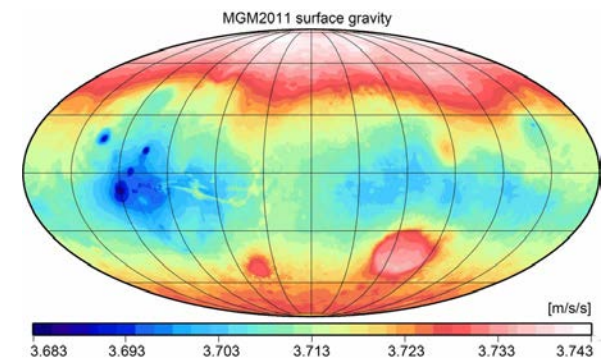
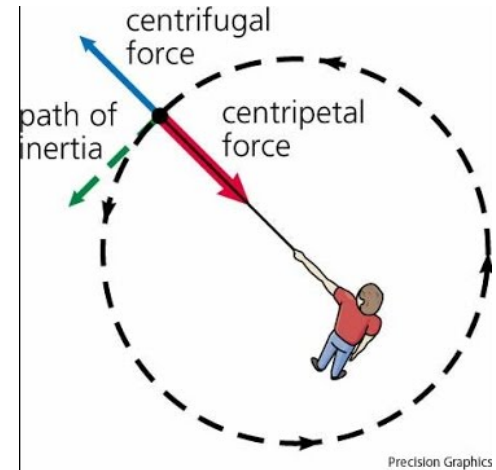
- Se o interior da Terra fosse uniforme
 - Valor da gravidade no elipsóide internacional de referência variaria em função da latitude geodésica (λ)
- Denominada de gravidade normal (g_N).
- Fórmula da Gravidade Teórica
 - Geodetic Reference System 1967 – em mGal = 10^{-5} m/s²

$$g_N = 978031.8 (1 + 5.28 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2 \lambda - 2.34 \cdot 10^{-5} \sin^4 \lambda)$$

Princípios Físicos

Valor da Gravidade Normal

- Importante pois fornece o valor da variação teórica da gravidade
 - Em função da latitude na superfície elipsoidal
- Definida por 3 fatores
 - Distância até o centro de massa da Terra
 - Nos polos < No equador
 - Concentração de massa
 - Nos polos < No equador
 - Aumenta ligeiramente a aceleração da gravidade
 - Força centrífuga
 - Nos polos < No equador
- Portanto...
 - A gravidade é maior nos Polos do que no Equador

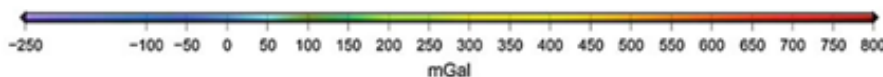
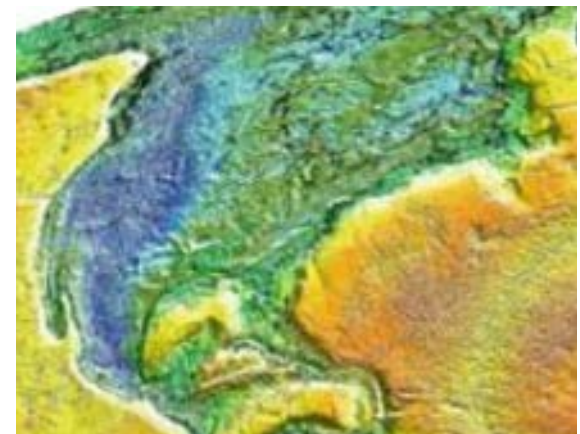
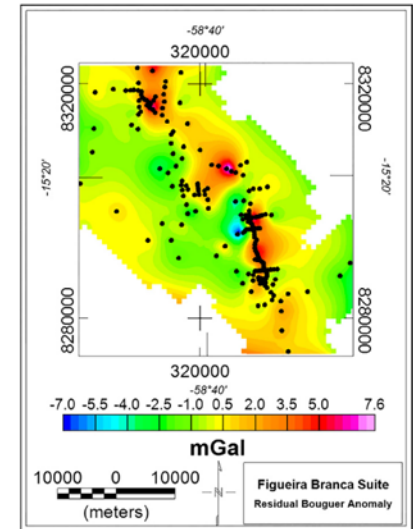


Superfície gravimétrica de Marte
<http://geodesy.curtin.edu.au/research/models/mgm2011/>

Gravimetria

Na prática

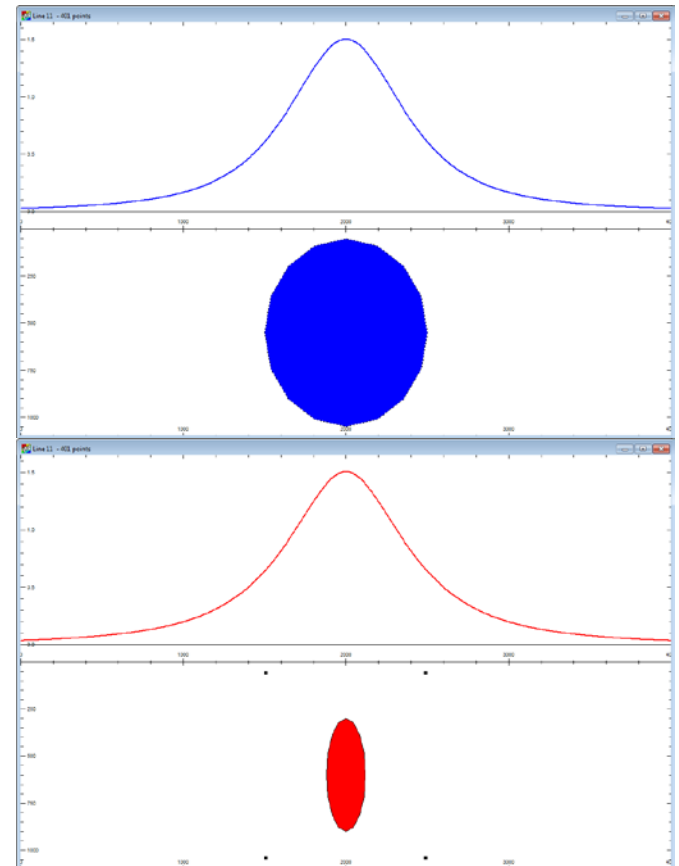
- Investigação de variações na densidade da litosfera (ρ)
 - Mais denso = Anomalia positiva
 - Dique de diabásio ($\rho \approx 3.1 \text{ g/cm}^3$)
vs.
 - Embasamento metassedimentar ($\rho \approx 2.6 \text{ g/cm}^3$)
 - Menos denso = Anomalia negativa
 - Espessas cadeias de montanhas
 - Composição andesítica ($\rho \approx 2.7 \text{ g/cm}^3$)
vs.
 - Sobre o manto listosféricos ($\rho \approx 3.3 \text{ g/cm}^3$)



Gravimetria

Na prática

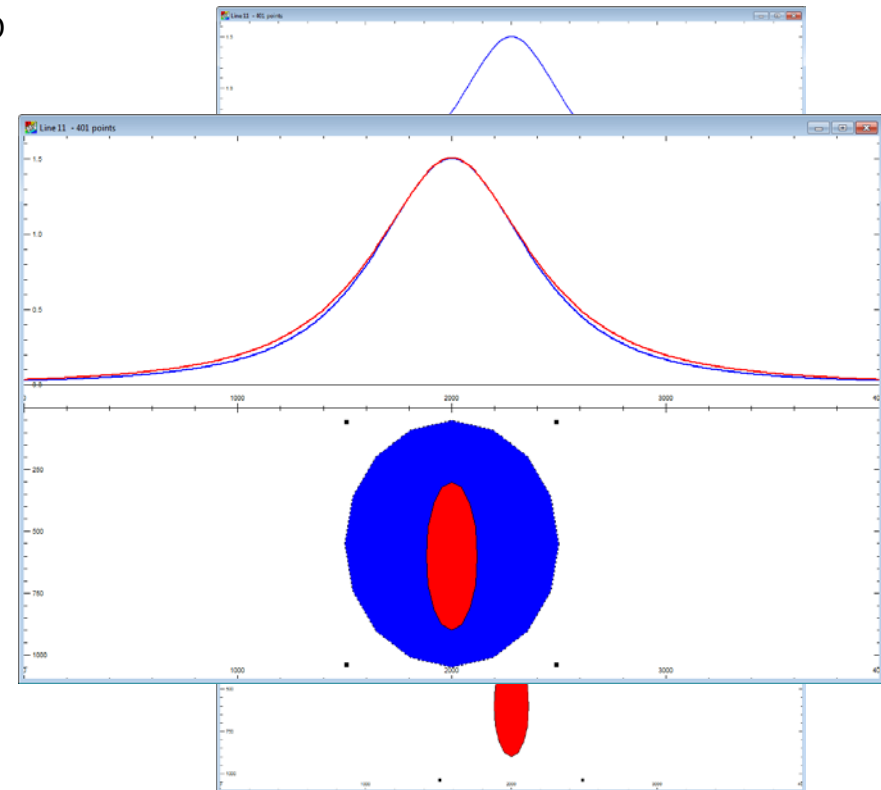
- Excelente método para delimitação lateral de estruturas
 - Limitado pela cobertura e resolução do levantamento
- Para investigações de profundidade
 - Da superfície ao topo do alvo em profundidade
 - É possível estimar
 - Não é o ponto forte do método
- Ambiguidade inerente ao método
 - Dois corpos de densidades diferentes
 - Se o mais denso estiver mais profundo
 - Se o menos denso estiver mais raso



Gravimetria

Na prática

- O sinal gravimétrico pode ser o mesmo
- Dependendo
 - Contrastes de densidade
 - Profundidades
 - Formas dos corpos



Gravimetria

Aquisições de Dados

- Mede-se a aceleração da gravidade
 - Absoluta
 - Gravímetro absoluto
 - Satélite/modelos
 - Relativa a uma medida absoluta
 - Gravímetro diferencial
- Mede-se a altitude ortométrica local
 - Distância entre a medida e o geóide



<http://microglaeste.com/wp-content/uploads/2017/03/A10-product.jpg>



<https://www.geomatrix.co.uk/cms/resources/gallery/g5-1-w1200h1200.jpg>



https://media.springernature.com/original/springer-static/image/art%3A10.1007%2Ff12210-015-0382-9/MediaObjects/12210_2015_382_Fig9_HTML.jpg



https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQPrmAPVawkNFjey5q_mg8cQmH9HVURVUSUaJfSM9U1MplNJ

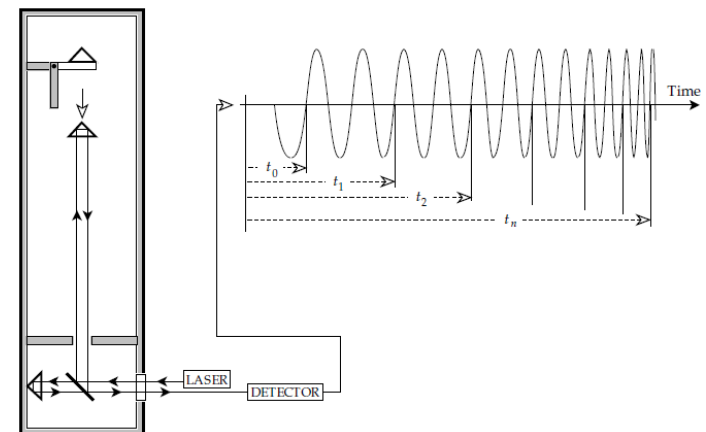
Gravimetria

Aquisições de Dados

- Gravímetros absolutos
 - Sistema de queda-livre
 - Para um objeto em queda a partir de z_0 com velocidade inicial u
 - E equação do movimento para o ponto z no tempo t

$$z = z_0 + ut - \frac{1}{2}gt^2$$

- Gravidade absoluta
 - Ajuste de uma função quadrática para vários t_n e z_n
- O tempo de queda é medido através de um laser.
- Precisão
 - 0,005 a 0,010 mGal



Gravimetria

Aquisições de Dados

- Gravímetros Diferenciais
 - Sistema Massa-Mola
 - Os primeiros gravímetros se baseavam na lei de Hooke
 - A massa m suspensa por uma mola de comprimento s_0
 - Causa uma distensão s

- A extensão é então proporcional a g

$$F = mg = -k(s - s_0)$$

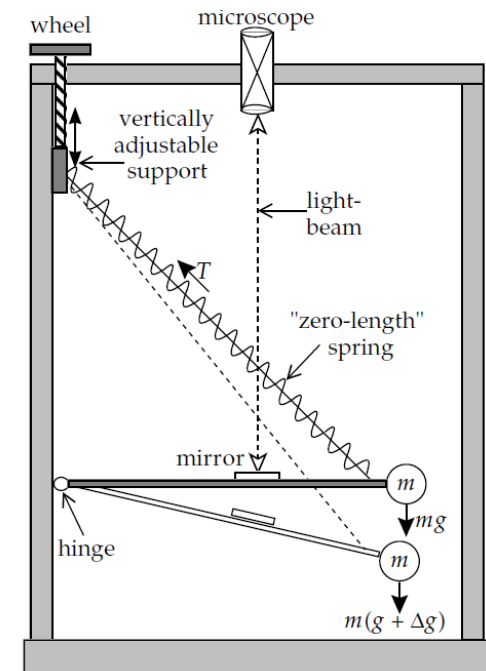
- onde k é a constante da mola
- O gravímetro é calibrado para um ponto com g conhecido
- Possível medir a diferença de g para dois pontos diferentes
- Precisão: 0,010 mGal



Gravímetro LaCoste & Romberg, Modelo G



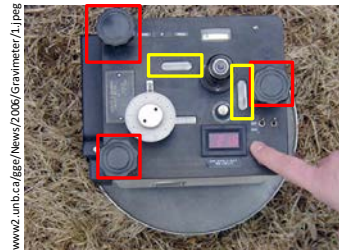
Gravímetro Scintrex CG-5



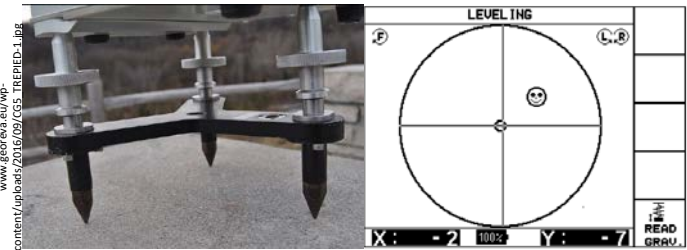
Gravimetria

Aquisições de Dados

- Nivelamento

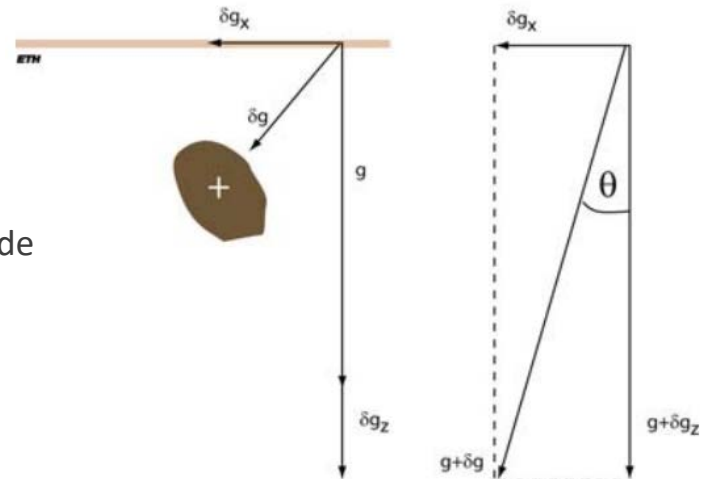


Gravímetro LaCoste & Romberg
Modelo G



Gravímetro
Scintrex CG-5

- Gravímetro sempre nivelado
- Obtenção da aceleração vertical da gravidade
- Efeitos laterais de corpos com contraste de densidade
- Praticamente desprezíveis



Gravimetria

Aquisições de Dados

- Gravímetro LaCoste & Romberg
 - Gravímetro de aquisição analógica
 - Extremamente sensível
 - Nunca deve ser deixado sem uma fonte de energia
 - Tomada
 - Bateria
 - Medidas tomadas pelo operador
 - Normalmente 3 medidas
 - Feita a média



<http://www.gravimeter-repair.com/portals/0/images/lygrnde.jpg>

Gravimetria

Aquisições de Dados

- Gravímetro Scintrex CG-5
 - Gravímetro de aquisição automática
 - Digital
 - Extremamente sensível
 - Nunca deve ser deixado sem uma fonte de energia
 - Tomada
 - Bateria
 - Número de medidas por minuto definida pelo usuário
 - Realizada a media dos valores adquiridos e o desvio padrão



Gravimetria

Aquisições de Dados

- Medição da altitude ortométrica
 - GPS diferencial
 - Nivelado
 - Com ao menos 4 satélites na visada
 - Tempo de aquisição variável
 - Depende
 - Tipo de processamento
 - Número de GPS's disponíveis
 - Distância da base
 - Real Time Kinematic (RTK)
 - 3 minutos
 - Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)
 - 10 a 15 minutos



https://pictop.com/pe/vp-content/uploads/2017/03/497b_8608-834dnt.jpg

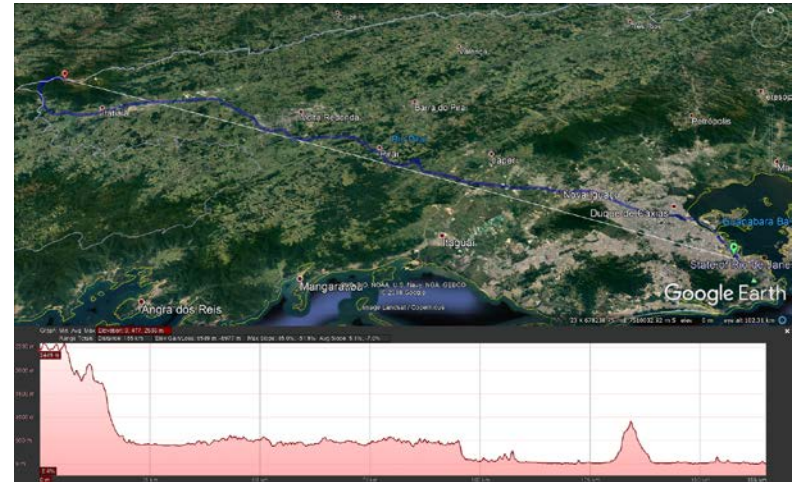


https://1.safeflick.com/9/2504/389892064_eaa33d4dc_2.jpg?z=1

Gravimetria

Aquisições de Dados

- Calibração
 - LaCoste & Romberg
 - Linha de pontos de referência
 - Grande variação topográfica
 - “g” é conhecido
 - Ex: Linha do Observatório Nacional até o topo da Serra de Itatiaia
- CG-5
 - Autocalibração no próprio gravímetro



Campo de Gravimetria

1) Checar a região

- Geologia
- Geomorfologia
- Pontos de Acesso

2) Checar Referências de Nível (RN; IBGE)

3) Ir para a região

4) 1a medida

- RN (Porta da Igreja, marcos em estradas, etc.)
- Não precisa medir altitude com GPS

5) Fazer medições (instalar estações gravimétricas)

- Precisa medir altitude com GPS
- Marcar a hora

6) Última medida

- RN (Porta da Igreja, marcos em estradas, etc.)
- Não precisa medir altitude com GPS

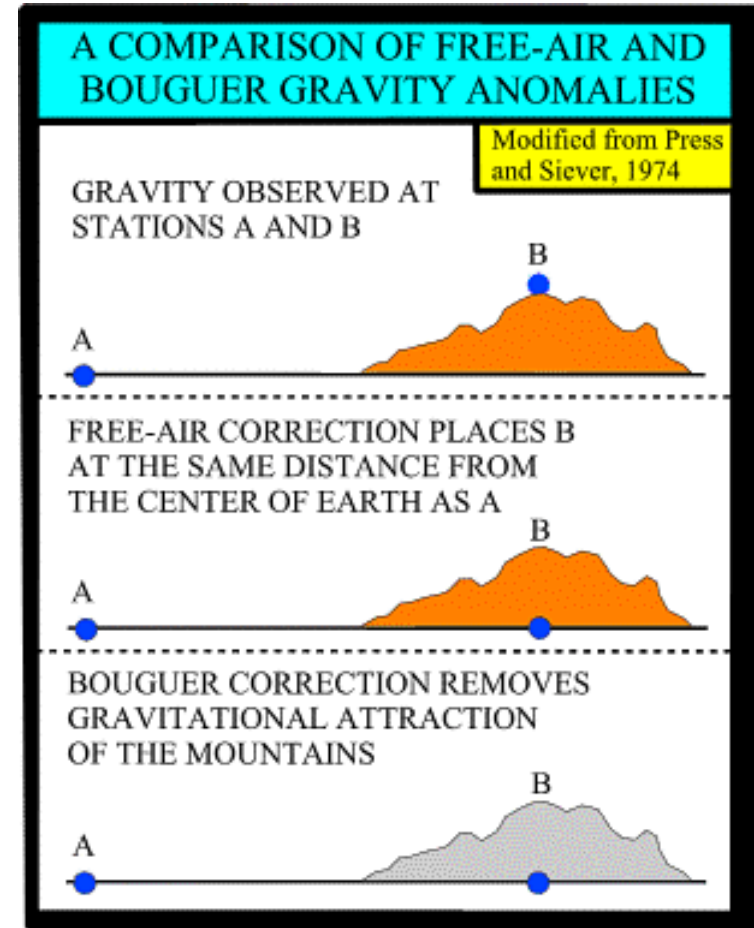
Importante!!!

- Marquem sempre as medidas em mais de um local

Gravimetria

Correções

- 1) Deriva instrumental
- 2) Correção de efeitos de latitude
- 3) Efeitos de mare sólida
 - Atração luni-solar
- 4) Efeito da altitude ortométrica
 - Anomalia Ar-Livre
- 5) Efeito da massa referente à altitude ortométrica
 - Anomalia Bouguer Simples
- 6) Efeitos de topografia
 - Anomalia Bouguer Completa
- 7) Efeitos de deslocamento
 - Anomalia Eötvös
 - Levantamentos transportados
- 8) Anomalia isostática

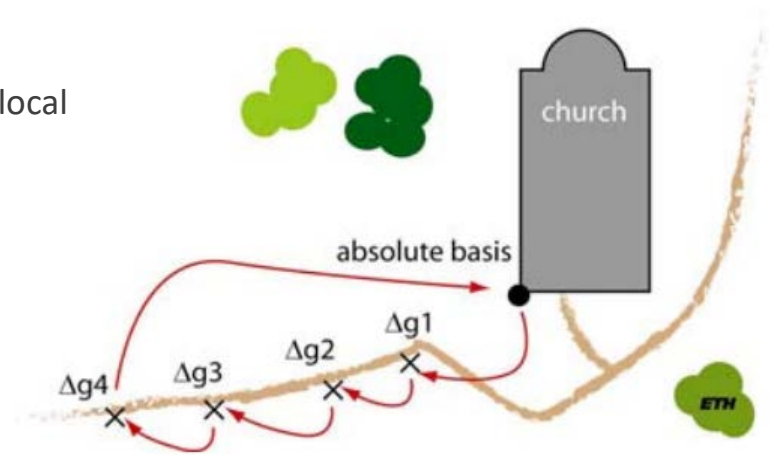


<https://pubs.usgs.gov/of/2000/of00-304/html/docs/chap02/images/gravity6.gif>

Gravimetria

Deriva instrumental

- Variações nas propriedades da mola
 - Temperatura
 - Tempo de uso do equipamento
- Correção
 - Medidas iniciais e finais em campo no mesmo local
 - Marcos do IBGE
 - Altitude
 - Aceleração da Gravidade
 - Anotação das horas de todas as medidas
 - Curva de deriva

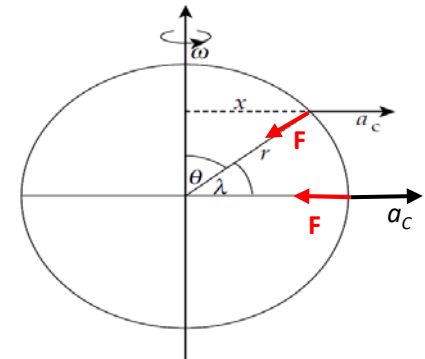


Gravimetria

Correção de efeitos de latitude

- A Terra não é perfeitamente esférica
 - Força centrífuga exercida em um corpo sobre a superfície varia em função da latitude
- Gravidade varia em função da latitude
- Pode ser feita em função a partir da fórmula internacional da gravidade (g_N)

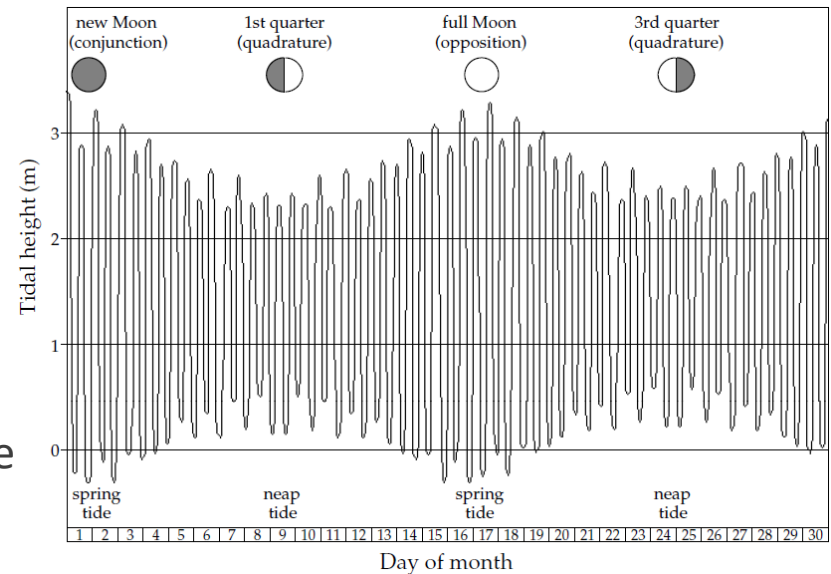
$$g_N = 978031.8 (1 + 5.28 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2 \lambda - 2.34 \cdot 10^{-5} \sin^4 \lambda)$$



Gravimetria

Efeitos de mare sólida (atração luni-solar)

- Durante o dia
 - Medições sujeitas a atração de maré
- Esse efeito varia com o tempo
 - Pode ser calculado com precisão
- Importante saber a hora das medições



Representação da variação da amplitude da maré em função da sobreposição do efeito lunar e solar (Lowrie, 2007).

Gravimetria

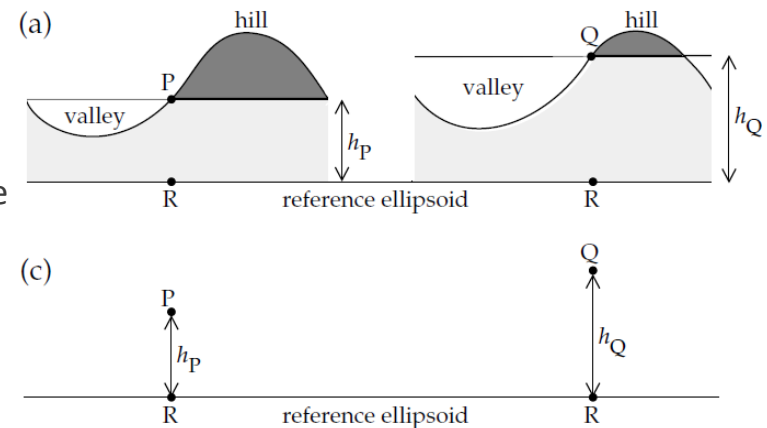
Efeito da altitude ortométrica (Anomalia Ar-Livre)

- Anomalia ar-livre (C_A):
 - Corrige a diferença entre...
 - Altitude do ponto amostrado (na superfície terrestre) e o geóide de referência
- Determinada por...
 - Gradiente vertical da aceleração da gravidade ($\partial g/\partial h$)
- Altitude ortométrica do ponto medido
 - h = distância vertical
 - Ponto de medida na superfície da Terra e o geóide

$$C_{FA} = -\frac{\partial g}{\partial h} h \approx 0.3086h$$

- Assim...

$$\Delta g_{FA} = g_{OBS} + 0.3086h - g_N$$



Gravimetria

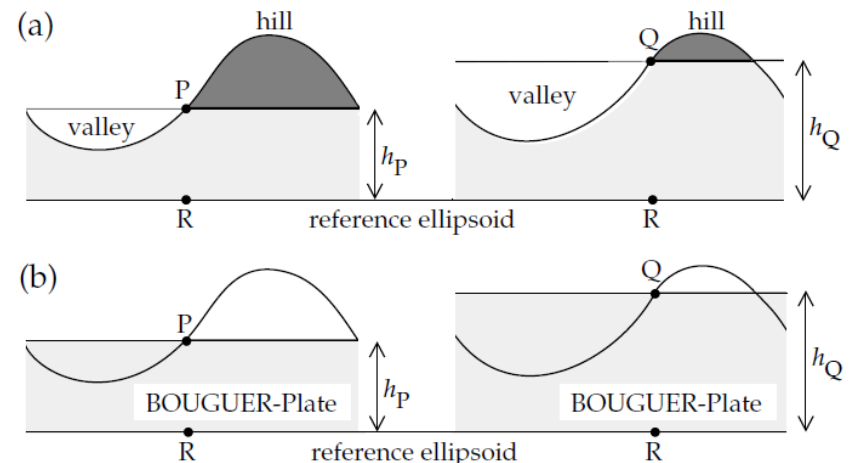
Efeito da massa referente à altitude ortométrica

- Anomalia Bouguer Simples (C_B):
 - Diferença de massa topográfica entre o geóide e a superfície física da Terra
 - Tanto ausência (ex. vales) quanto excesso de massa (alto topográfico)
- A aceleração gravitacional exercida pelas massas topográficas é expressa por:

$$C_B = 2\pi\rho gh \approx 0.041909 \cdot 10^{-8}$$

- onde

- $G = 2.670 \times 10^{-8} \text{ cm}^3\text{g}^{-1}\text{s}^{-2}$
- Constante de Gravitação Universal
- $\rho = 2.67 \text{ g.cm}^{-3}$
- Densidade média da crosta



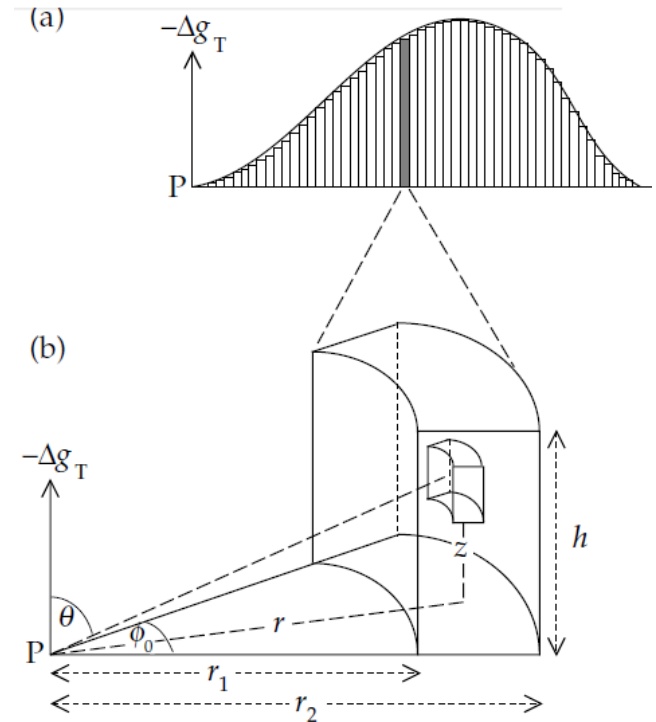
Gravimetria

Efeitos de topografia (Anomalia Bouguer Completa)

- Correção de Terreno (Δg_T)
 - Se a medida for feita próximo a uma montanha
 - Influência dessa deve ser corrigida
- Cálculo
 - Dividindo do terreno em diferentes prismas
 - Considerando a contribuição de cada um

$$\Delta g_T = G\rho\phi_0 \left[\left(\sqrt{r^2 + h^2} - r_1 \right) - \left(\sqrt{r^2 + h^2} - r_2 \right) \right]$$

- Geralmente necessárias quando
 - Diferença topográfica dentro de um setor
 - Superior a cerca de 5% da sua distância entre estações



Gravimetria

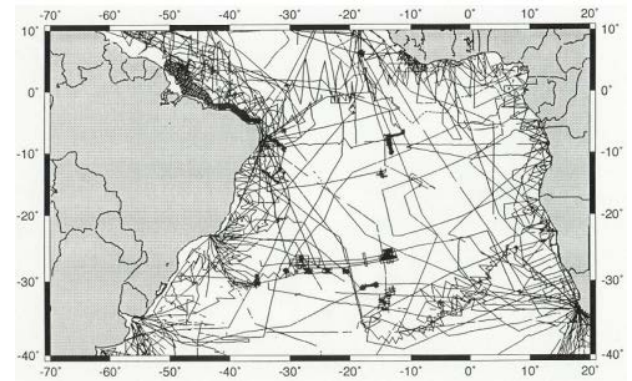
Efeitos de deslocamento (Anomalia Eötvös)

- Correção de Eötvös (g_E)
- Deve ser aplicada quando o gravímetro encontra-se em movimento
 - Ex.: Navio
 - Depende da direção do movimento.
- Essa correção é dada por

$$g_E = 7.503v \cos \lambda \operatorname{sen} \alpha + 0.004154v^2 \quad \text{em nós}$$

$$g_E = 14.585v \cos \lambda \operatorname{sen} \alpha + 0.015696v^2 \quad \text{em m/s}$$

- Onde
 - v = velocidade do navio
 - α = azimute
 - λ = latitude.



Gravimetria

A anomalia Bouguer é dada pela aplicação de todas as correções (necessárias)

$$\Delta g_B = g_{OBS} + (\Delta g_{FA} - \Delta g_B + \Delta g_T + \Delta g_{Tide}) - g_N$$

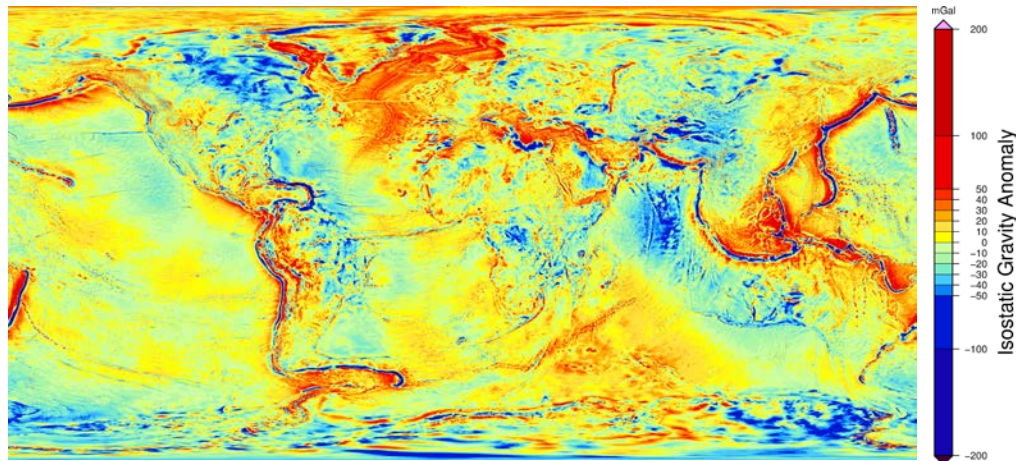
Onde:

- g_{OBS} e g_N são os valores da gravidade observada e teórica,
- Δg_{FA} é a correção Ar-Livre ou Faye,
- Δg_B é a correção Bouguer,
- Δg_T é correção de terreno e
- Δg_{Tide} é a correção de maré.

Gravimetria

Isostasia

- Processo de compensação à imposição de forças sobre a crosta
 - Como a crosta reage ao acúmulo de massa/carga sobre ela
 - e.g.: regiões de orógenos
- Modelos
 - Modelo de Airy-Heiskanen
 - Modelo de Pratt-Hayford
 - Modelo de placa elástica de Vening-Meinesz

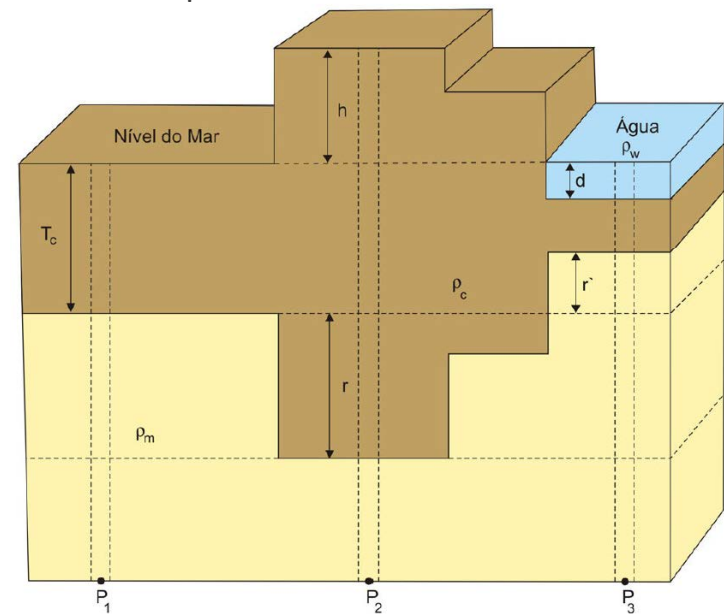


Gravimetria

Modelo de Airy-Heiskanen

- Crosta terrestre fina e sólida pouco resistente
 - Apoiada sobre um substrato de densidade maior e de consistência plástica
 - Manto
- Inserção de carga
 - E.g.: orógeno extenso
 - Rompimento da crosta e afundamento do orógeno
 - Até equilíbrio por empuxo
- Compensação da massa do relevo
 - Falta de massa criada pelo deslocamento de parte do material do substrato
 - Substituição pela crosta menos densa

Modelo de Airy

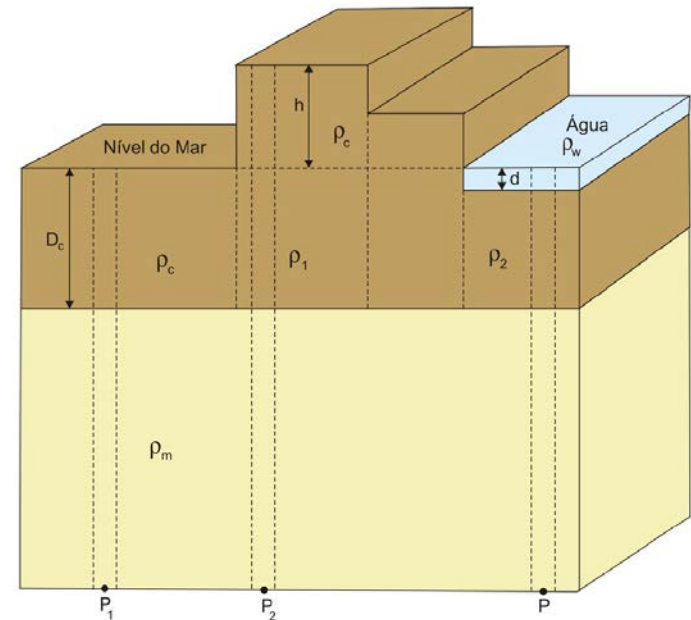


Gravimetria

Modelo de Pratt-Hayford

- Espessura da crosta constante
- Divisão em colunas
- Variação lateral da densidade
- Para uma dada profundidade
 - Peso das várias colunas de diferentes densidades
 - Equilibrado pela força de empuxo
- Quanto mais elevada for a coluna acima de uma base
 - Menor a densidade

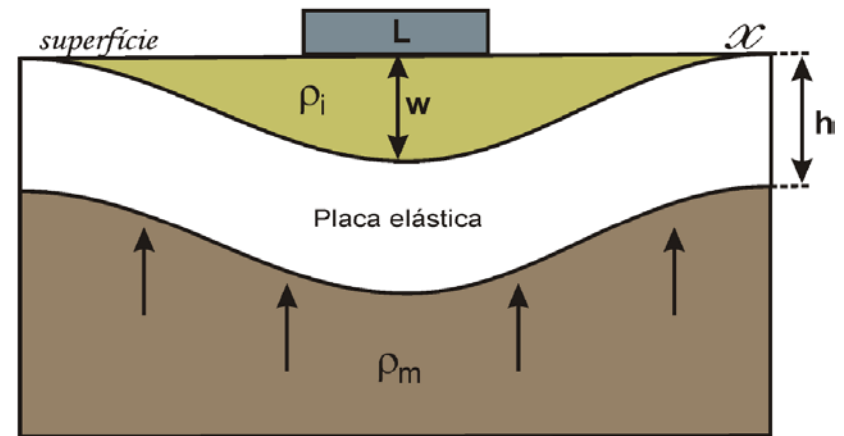
Modelo de Pratt



Gravimetria

Modelo de placa elástica de Vening-Meinesz

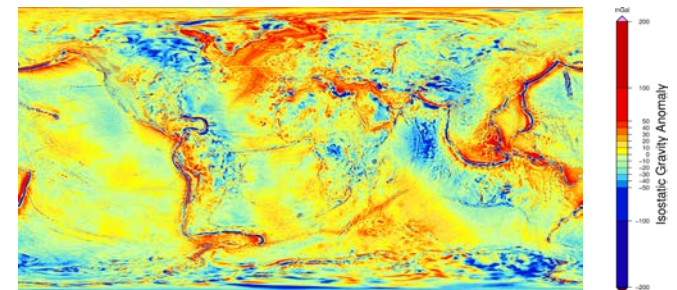
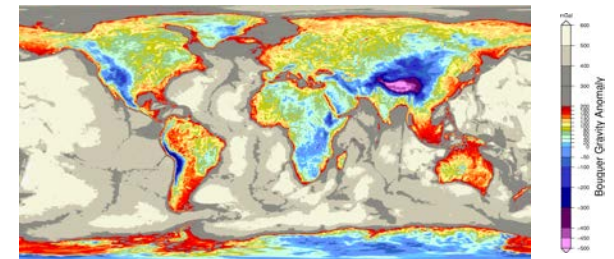
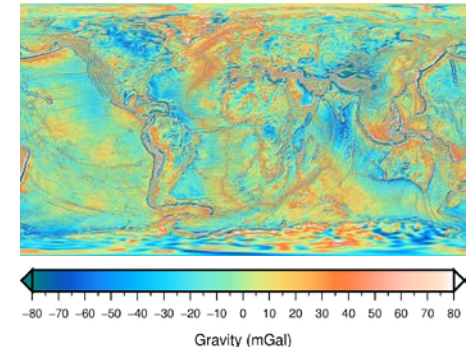
- Camada superior mais leve
 - Flutua sobre um substrato fluido mais denso
 - Age como uma placa elástica
 - Sobre um fluido pouco rígido
 - Compensação se estende lateralmente
- Carga topográfica inclina a placa para baixo afundando no substrato
 - Substrato é deslocado lateralmente
- O empuxo empurra a placa para cima
 - Suportando a inclinação da placa em locais afastados da depressão central



Gravimetria

Produtos Finais

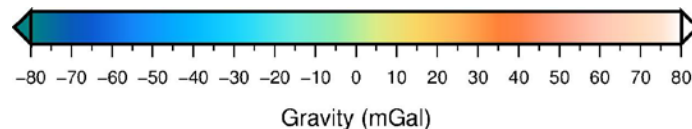
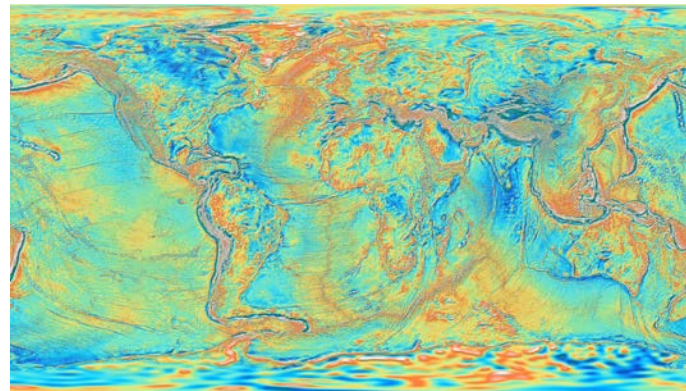
- Mapa de Anomalia Ar-Livre
 - Levantamentos aéreos e marinhos
- Mapa de Anomalia Bouguer Simples
 - Levantamentos Terrestres em terrenos pouco acidentados
- Mapa de Anomalia Bouguer Completa
 - Levantamentos terrestres em terrenos de topografia complexa
- Mapa de Anomalias Gradiométricas e de Anomalia Eötvos
 - Levantamentos aéreos e marinhos
- Mapa de Anomalia Isostática



Gravimetria

Interpretação

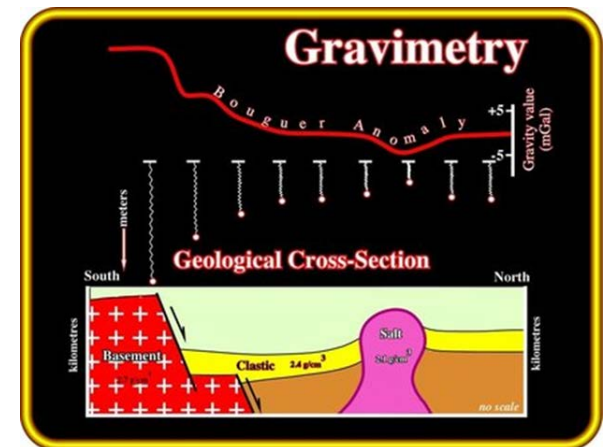
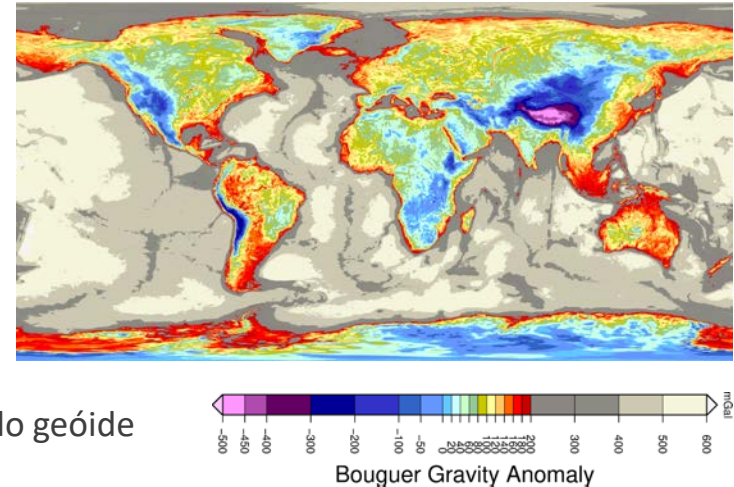
- Anomalia Ar-Livre (Free-Air)
 - Correção Ar-Livre
 - Remove variações gravimétricas causadas por diferenças de elevação em relação ao geóide
 - *Geóide*
 - *Superfície equipotencial equivalente ao nível médio dos mares não perturbados*



Gravimetria

Interpretação

- Anomalia Bouguer
 - Remove o efeito de excesso de massa
 - Referente à elevação corrigida na correção Ar-Livre
 - Massa referente à elevação em relação ao nível do geóide
- Simples
 - Assume um terreno aproximadamente plano
 - Calota Bouguer
- Completa
 - Assume uma topografia complexa
 - Algoritmos subdividem a topografia em prismas
 - Cálculo individual das contribuições de massa



Gravimetria

Interpretação

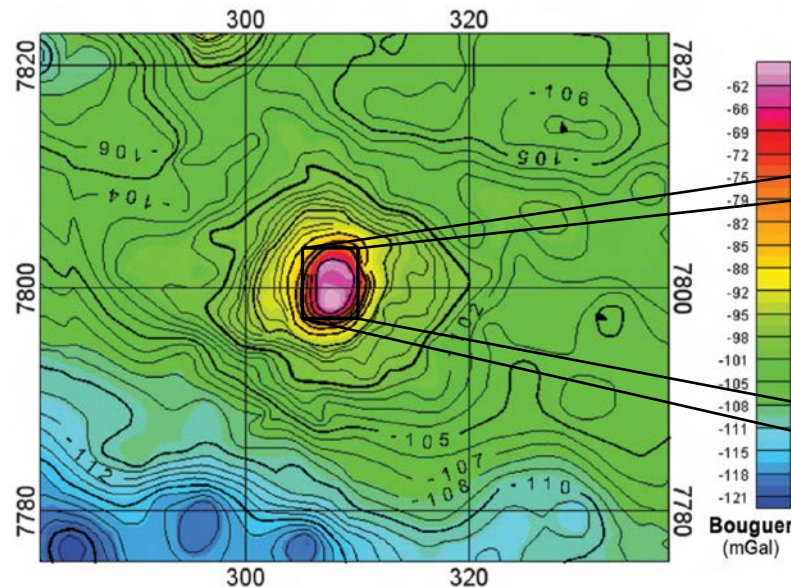
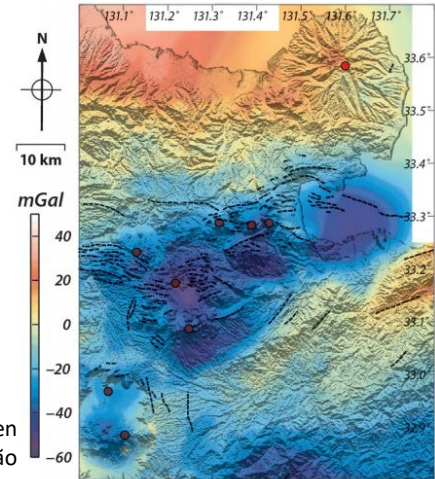
- Anomalia gravimétrica
 - Gerada pela distribuição heterogênea da densidade em profundidade

- Contraste de densidade

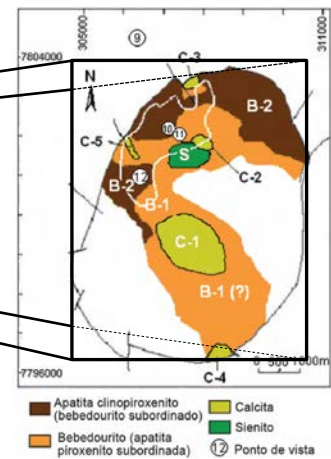
$$\Delta\rho = \rho - \rho_0$$

- Dois tipos

- Anomalia positiva
- Anomalia negativa



Complexo Alcalino de Tapira



Gravimetria

Interpretação

- A anomalia deriva da presença de diferentes densidades na Terra
- A “aparência” da anomalia depende de
 - Dimensões
 - Contraste de densidade
 - Profundidade do corpo anômalo
- **Corpos mais rasos**
 - Tendem a produzir anomalias estreitas e de amplitude mais definida
 - Pequenos comprimentos de onda
- **Anomalias de grande comprimento de onda**
 - Tendem a pertencer a grandes estruturas ou corpos em altas profundidades

Gravimetria

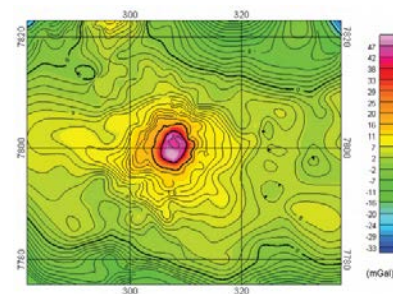
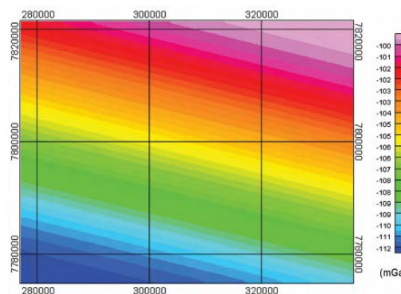
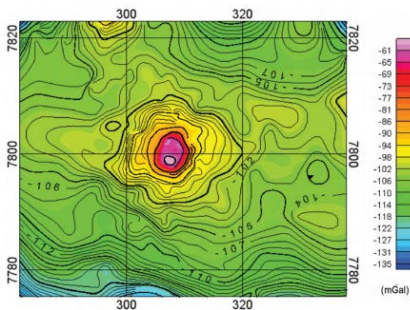
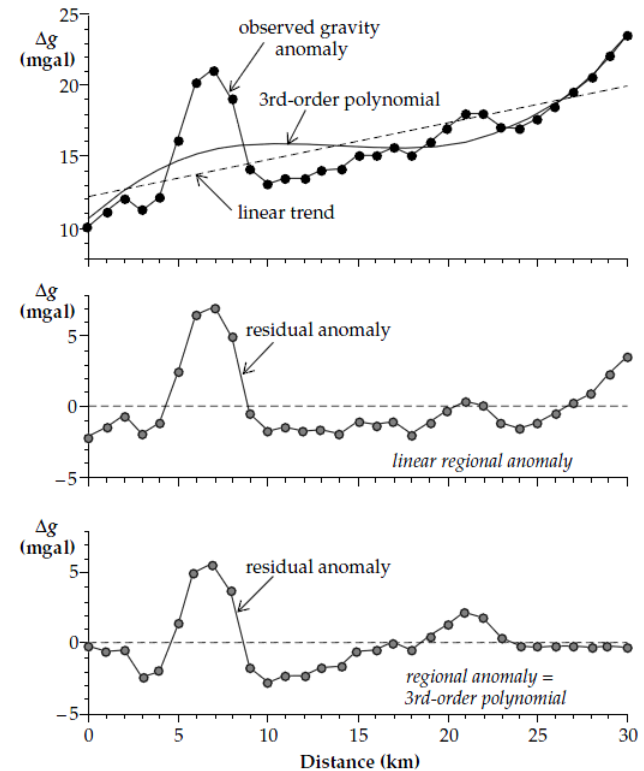
Pós-Processamento

- Filtragem regional-residual
 - Objetivo: remover a influencia da componente regional dos dados
 - Diversas técnicas como: espectro de potência e continuação para cima
- Técnicas de realce da anomalia
 - Objetivo:
 - Realçar uma informação (lineamentos e contatos)
 - Derivadas do campo gravimétrico
- Estimativa de propriedade
 - Profundidade de topo
 - Deconvolução de Euler
 - EHD-Depth
 - Densidade
 - Modelagem
 - Inversão

Gravimetria

Pós-Processamento

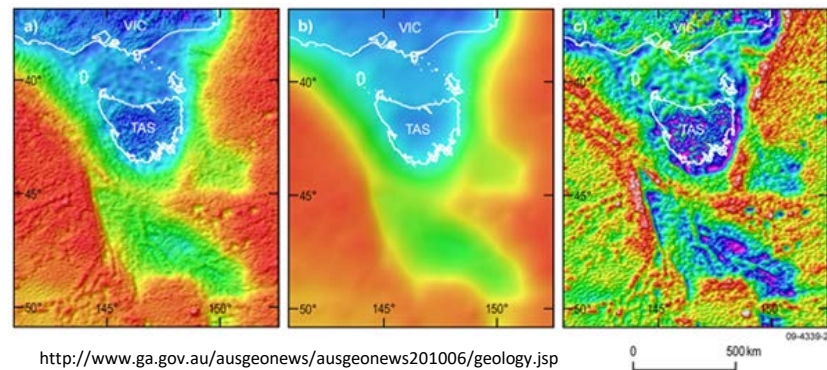
- Filtragem regional-residual
- Objetivo
 - Isolar a contribuição da anomalia de interesse
- Procedimento
 - Ajusta uma superfície
 - Melhor aproximação do comportamento regional
 - Remoção do campo original
- Atenção!
 - Não falsear a anomalia



Gravimetria

Interpretação

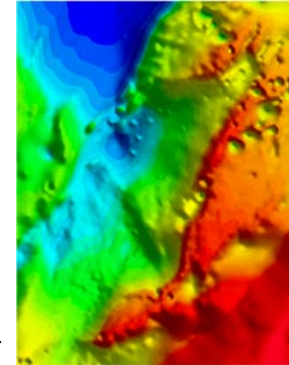
- Upward continuation
- Estima o comportamento do sinal de uma região para alturas maiores
- Objetivo
 - Atenuar as anomalias de pequeno comprimento de onda (superficiais)
- A filtragem é feita ponto a ponto



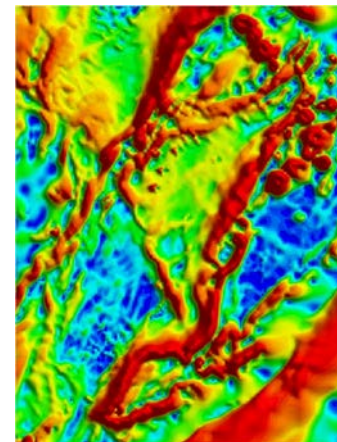
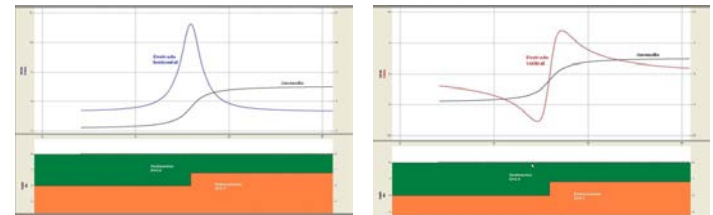
Gravimetria

Interpretação

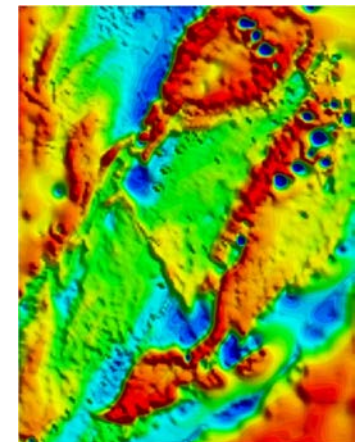
- Após a filtragem regional-residual
 - Técnicas de realce
- Ex:
 - Derivadas horizontais
 - Filtros passa-alta, passa-baixa ou passa-banda
 - Sinal Analítico (2D e 3D)
 - Etc.
- Importante
 - Qual o significado geológico do sinal observado?
 - Como o filtro aplicado influencia o sinal?
 - Gera falseamento?
 - É estável?
 - Aumenta a influência de ruídos de alta frequência?



Mapa da Anomalia Bouguer



Derivada Horizontal



Derivada Vertical

Gravimetria

Interpretação

- Meia Largura
 - Definida como o ponto ao longo de um perfil
 - Onde a amplitude da anomalia cai pela metade do valor máximo

$$g_{\max} = \frac{4}{3} \pi G \left(\frac{R^3 \Delta \rho}{z^2} \right) = \frac{GM}{z^2}$$

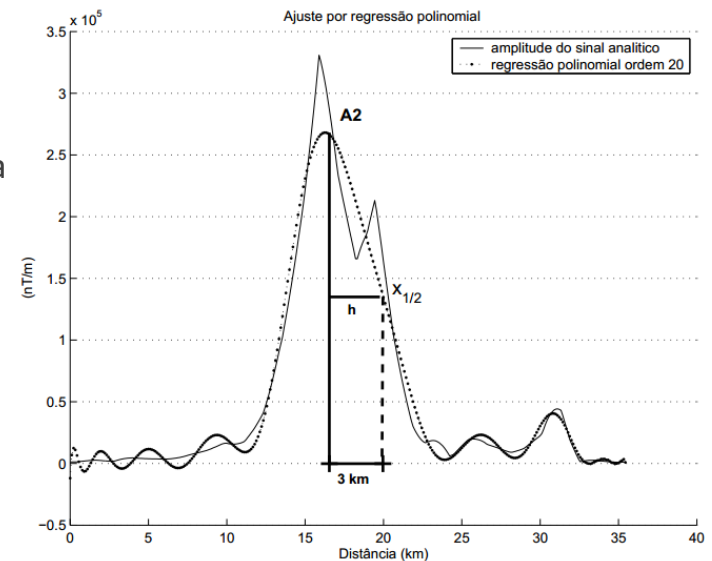
- Para uma esfera centrada em (0, 0, z)
 - Amplitude máxima ocorre sobre o centro de massa

- Em $x = x_1/2$

- $g_z = g_{\max}/2$

- Sendo z máximo dado por:

$$z < \frac{x_{1/2}}{\left(4^{1/3} - 1\right)^{1/2}}$$



Gravimetria

Interpretação

- Thompson (1982) e Reid et al. (1990)
- Dada pelo desenvolvimento da equação diferencial homogênea de Euler

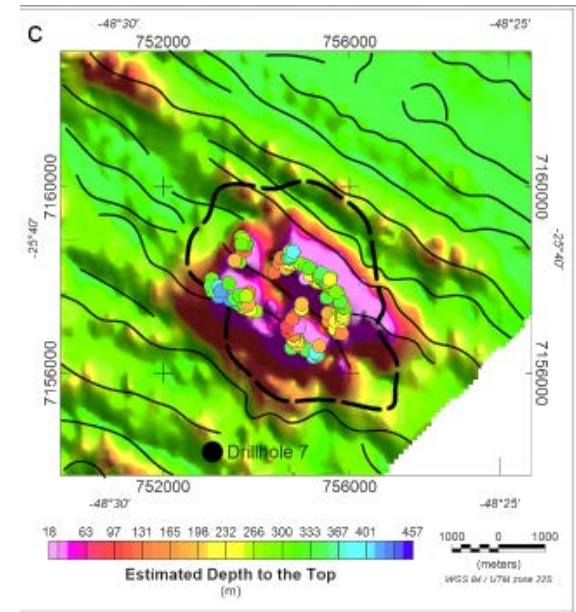
$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = \eta(R - M)$$

- Onde:

- x_0 , y_0 e z_0 = coordenadas da fonte
- M = Anomalia gravimétrica
- R = Campo gravimétrico residual
- H = Índice Estrutural

- H = Índice Estrutural

- Medida da taxa de decaimento da anomalia gravimétrica entre a fonte e o ponto de medida e a fonte
- Depende diretamente da geometria
 - Esfera – 2
 - Cilindro – 1
 - Dique – 0
 - Soleira (Sill) – 0



Gravimetria

Interpretação

- Modelo 3D
 - Objetivo:
 - caracterizar o comportamento em profundidade
 - Estimar a região com maior contraste de densidade
 - Importante:
 - Ambiguidade dos métodos potenciais!
 - Sinal associado a uma fonte rasa com pouco contraste X fonte profunda com altas densidades
 - Como evitar:
 - Máximo de informações possíveis sobre o alvo de estudo
 - Ex:
 - Informações sobre a geologia
 - Local e/ou regional
 - Se aflorante
 - Amostras para estimar densidade em laboratório
 - Estimar os limites laterais
 - Sinal analítico, derivadas horizontais, etc.

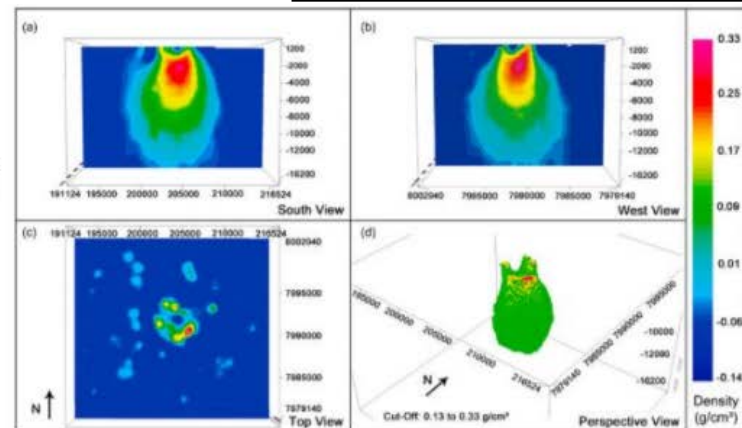
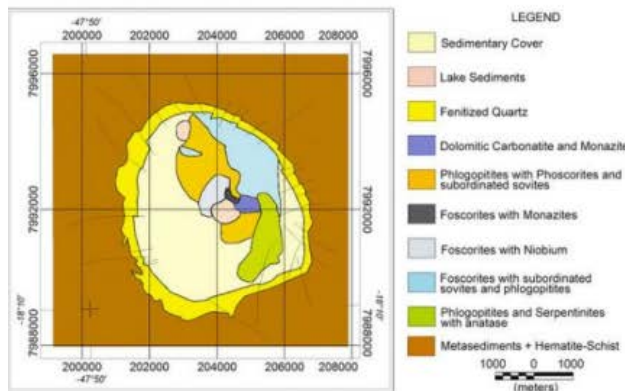
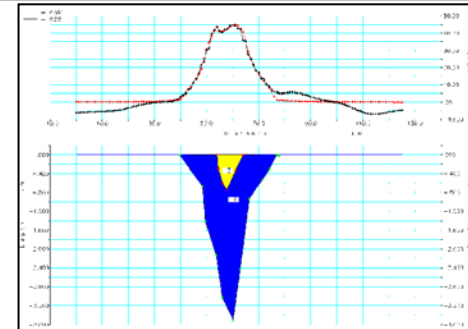
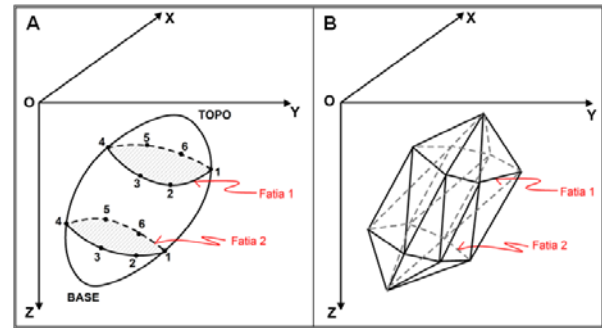
Gravimetria

Interpretação

Modelo 3D

- Modelagem direta
 - 2D (ex: algoritmo de Talwani et al. 1959)
 - 3D (ex: Barnett 1976)

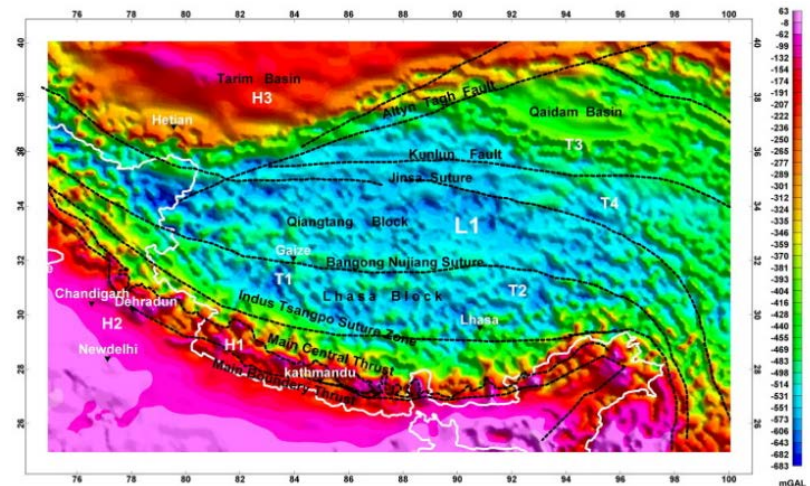
- Inversão 3D
 - 3D (ex: Li e Oldenbrug, 2002)



Gravimetria

Interpretação

- Platô do Tibet
- Escala de placas tectônicas
- Anomalia de gravidade Bouguer completa
- Ordem de -1000 mGal
- O planalto fica a altitudes muito elevadas
- Devido ao espessamento da crosta associado à colisão dos continentes Índia e Eurásia
 - A crosta continental espessada
 - $\rho_c = 2670 \text{ kg.m}^{-3}$
 - Manto em horizontes mais profundos
 - $\rho_m = 3300 \text{ kg.m}^{-3}$

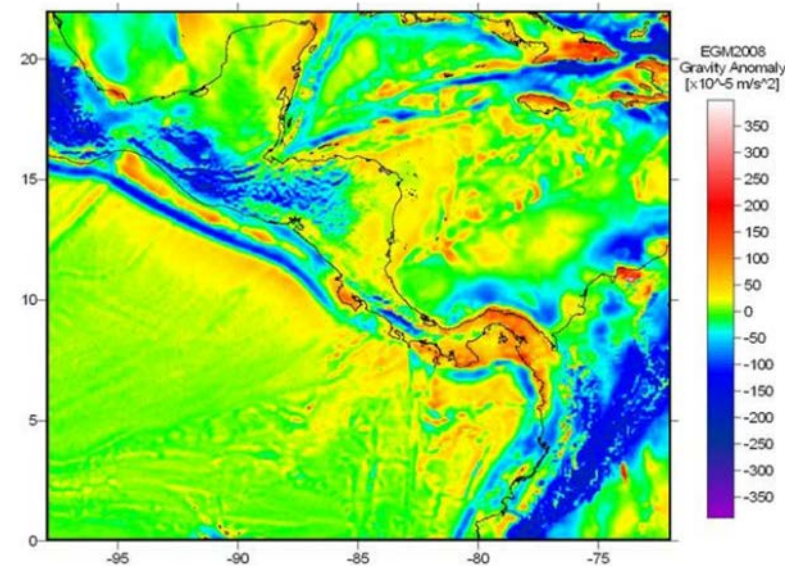
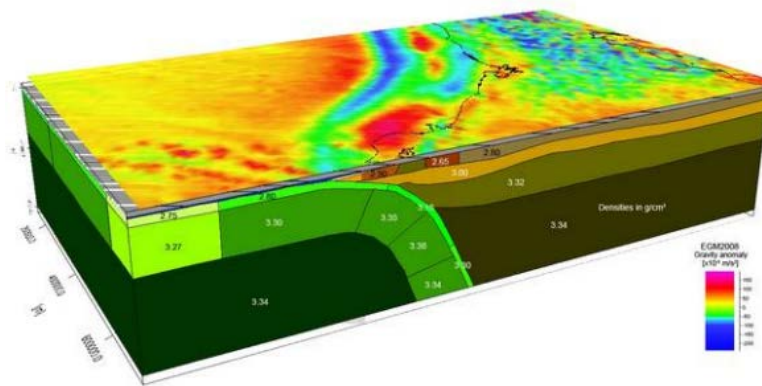


(GRACE gravity data, Mishra et al., 2012, Journal of Asian Earth Sciences, 48:93–110)

Gravimetria

Interpretação

- Costa do Pacífico na América Central
 - Trincheira oceânica e o limite da placa transformante (placas do Caribe e da América do Norte)
 - Dados GRACE
 - Dados regionais usados para modelar variações de densidade na zona de subducção
 - Associadas a
 - Arco vulcânico
 - Desenvolvimento da crosta
 - Mudanças na placa subdutada



(modelo do site GFZ)

Gravimetria

Interpretação

- o Bacia de Nordkapp (Noruega)

- o Modelo de diapiros de sal

- o Domo salino 'Uranus' na Bacia Nordkapp (Noruega)
 - o Dados de sísmica + gradiometria gravitacional

- o Perfil sísmico

- o Ilustra a falta de refletores na base do sal
- o Apresenta modelos de extensão de sal
 - o Topo e base da interpretação do pré-poço

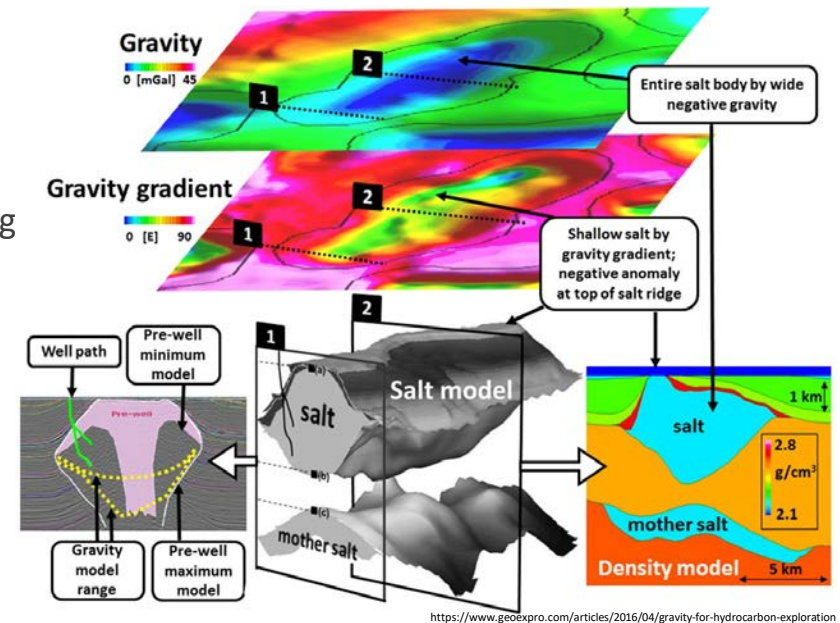
- o Dados do poço

- o Provaram que o modelo mínimo estava errado

- o Aquisição de novos dados de gravidade e gradiometria gravimétrica

- o Modelo de densidade

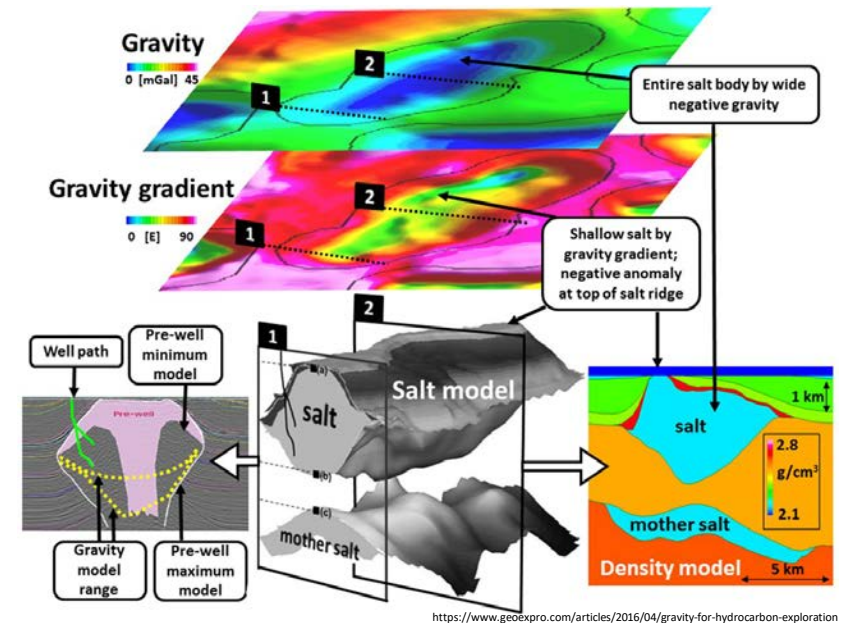
- o Desenvolvido usando limites sedimentares e todo do sal da sísmica e densidades de poços



Gravimetria

Interpretação

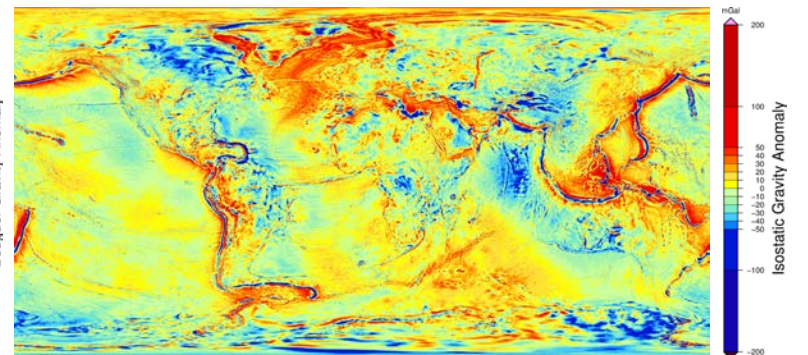
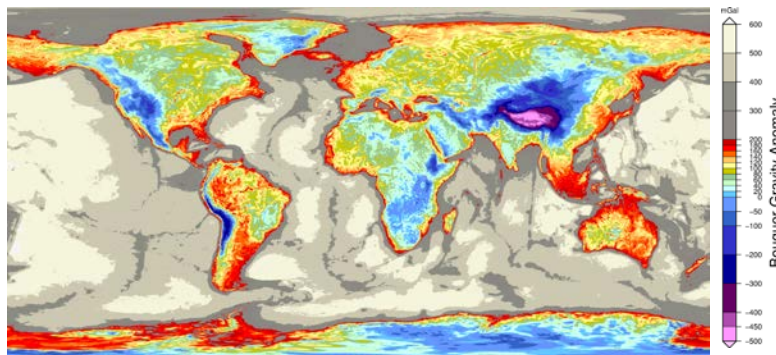
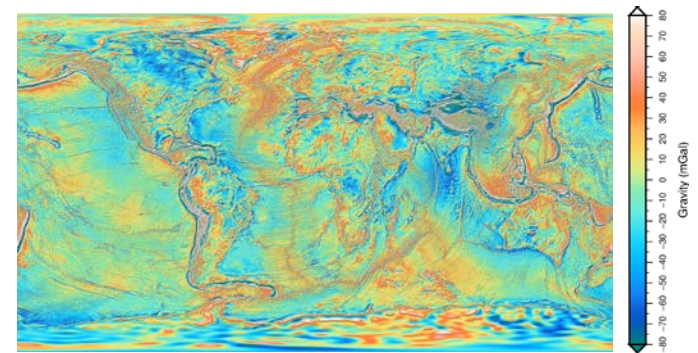
- Bacia de Nordkapp (Noruega)
 - O sal
 - Contraste de densidade negativa com a encaixante
 - Gerando uma anomalia de gravidade negativa
 - Gradiente vertical de gravidade (G_{zz})
 - Detecta a parte mais rasa do sal
 - Gravidade G_z
 - Sensível às partes mais profundas do corpo de sal
 - Planejamento de levantamento
 - Modelos gravitacionais iniciais
 - Orientação ideal e processamento sísmico para QC das velocidades sísmicas
 - Velocidades podem ser convertidas em um modelo de densidade
 - Resultando em anomalias de gravidade correspondentes
 - Interpretação sísmica
 - Pode ser melhorada em um loop iterativo com modelagem e inversão gravitacional



Gravimetria

Interpretação na Tectônica de Placas

- Comportamentos específicos em limites de placas
 - De acordo com o tipo de rochas envolvidas
 - Limites Compressivos
 - Limites Distensivos
 - Limites Transformantes



Gravimetria

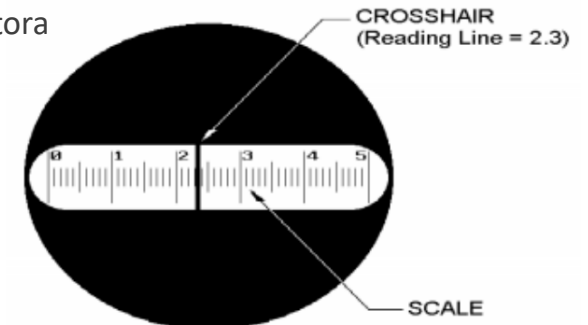
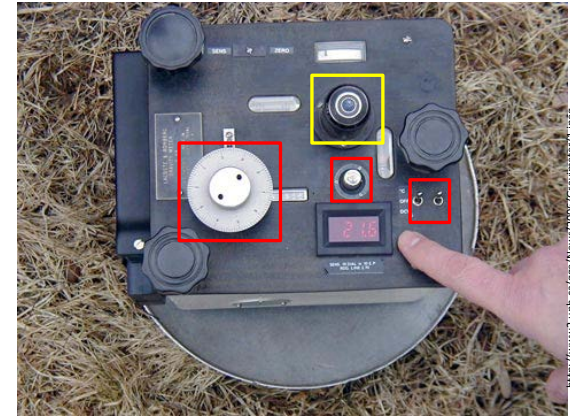
Extra

- Passo a passo de como configurar e executar medições
 - Gravímetro Diferencial Lacoste & Romberg
 - Gravímetro Diferencial Scintrex CG-5

Gravimetria

Lacoste & Romberg

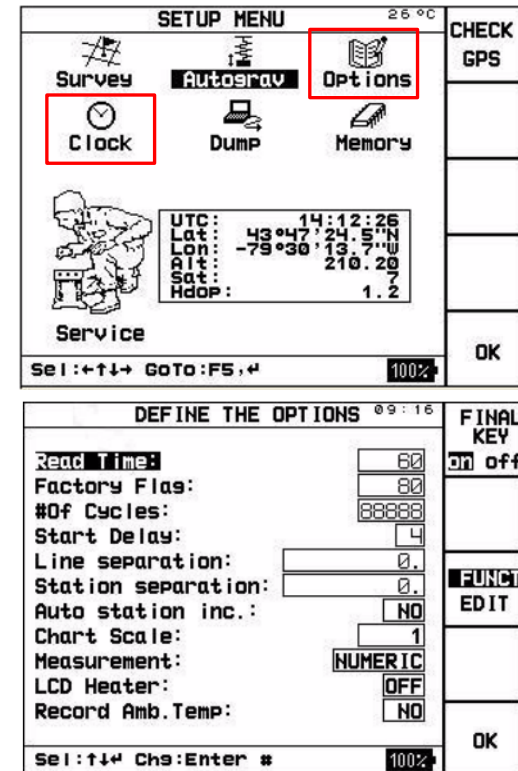
- Configuração em campo
- Início da medição
 - LaCoste e Romberg
 - 1) Ligar o equipamento
 - 2) Destravamento da mola
 - 3) Giro do dial várias vezes no sentido anti-horário
 - 3.1) Soltando a massa
 - 4) Giro do dial no sentido horário
 - 4.1) Até o capilar atingir o valor definido pela companhia produtora
 - 4.1.1) Informado na aquisição do equipamento
 - 5) Travamento da mola
 - 6) Desligamento do equipamento



Gravimetria

Scintrex CG-5

- Configuração anterior ao campo
 - Definição de data e hora
 - Definição de tempo de medição
 - Read Time
 - Definição da frequência de medidas (medidas por minuto)
 - # of cycles
 - Em caso de Levantamento regular
 - Separação de linhas
 - Separação de estações
 - Mudança automática de estações
 - Modo de visualização dos dados
 - Numérica
 - Gráfica

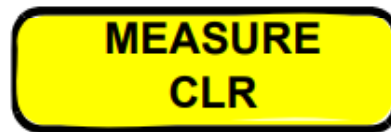


Gravimetria

Scintrex CG-5

- Configuração em campo
- Inserção de parâmetros básicos
- Código do Levantamento
- Cliente
- Operador
- GPS do gravímetro ou manual (opcional)
- Localização
- Altitude aproximada

Botão



SETUP MENU 26 °C

Survey **Autograv** **Options**

Clock **Dump** **Memory**

UTC: 14:12:26
Lat: 43°47'24.5"N
Lon: -79°30'13.7"W
Alt: 210.20
Sat: 7
HdOP: 1.2

Service

Sel: ↑↑↓ GoTo: F5, ← 100%

CHECK GPS

OK

SURVEY HEADER 26 °C

Survey ID: Default
Customer: Default
Operator: Default

GRID REFERENCE:

Latitude: 43.9N
Longitude: 79.6W
Azimuth: 0.
Elevation: 0.
UTM Zone: 0
GMT Diff.: 5.

Sel: ↑↓← Ch9: Alpha, ↔ 100%

PARAMS

READ GPS

FUNCT EDIT

CANCEL

OK

Gravimetria

Scintrex CG-5

- Início da medição
 - 1) Aperte o botão MEASURE CLR
 - 2) Nivele o gravímetro
 - 3) Clique em READ GRAV
 - 4) Aguarde o tempo configurado
 - 5) Clique em FINAL DATA
 - 6) Cheque os valores
 - 6.1) Se ruins (S.D. > 0.800)
 - 6.1.1) Aperte CANCEL
 - 6.2) Se adequados (S.D. ≤ 0.800)
 - 6.2.1) Aperte RECORD

