

OBSERVATÓRIO NACIONAL

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

PROPOSTA DE TESE DE DOUTORADO

**Inversão 3D de campos gravitacionais para determinação
de corpos e interfaces geológicas em coordenadas
esféricas**

ALUNO: Leonardo Uieda

ORIENTADORA: Valéria Cristina Ferreira Barbosa

31 de Junho de 2011

Objetivos

Este projeto propõe o desenvolvimento de métodos de inversão 3D de dados de altura geoidal, gravimétricos e de gradiometria gravimétrica. Presumiremos que tanto os dados como os resultados da inversão estão definidos em coordenadas esféricas, tornando possível levar em consideração a curvatura da Terra. Desta forma, é viável realizar a interpretação de dados gravimétricos que cobrem áreas extensas, como dados de satélite e do BNDG (Banco Nacional de Dados Gravimétricos). Para tanto, a subsuperfície será discretizada em prismas esféricos, conhecidos como tesseroides, ao invés de prismas retos retangulares. Neste projeto, serão desenvolvidos dois métodos distintos para a inversão.

Um dos métodos será utilizado para a determinação de corpos geológicos 3D compactos. Este método buscará estimar a distribuição de contrastes de densidade em subsuperfície. Para tanto, a subsuperfície será discretizada em tesseroides justapostos horizontalmente e verticalmente. Presumiremos que cada tesseróide possui um contraste de densidade homogêneo porém desconhecido. Os parâmetros a serem estimados na inversão são os valores de contraste de densidade de cada tesseróide. O algoritmo de inversão utilizado será uma adaptação para tesseroides do método desenvolvido por Uieda e Barbosa (2011). Exemplos de estruturas geológicas que este método possivelmente será capaz de interpretar incluem diques e soleiras, corpos salinos, intrusões, câmaras magmáticas, entre outros. Além disto, o método desenvolvido poderá ser utilizado para avaliar se estruturas detectadas pela tomografia sísmica em coordenadas esféricas, como placas em subducção e plumas mantélicas, são capazes de explicar os dados gravimétricos.

O segundo método proposto buscará determinar o relevo de uma interface geológica separando dois meios. A interface será discretizada em tesseroides justapostos horizontalmente e com contraste de densidade conhecido. Os parâmetros a serem estimados na inversão são a espessura de cada tesseróide. A estabilidade das soluções será garantida utilizando regularizadores de Tikhonov (Tikhonov, 1963) e de Variação Total (Martins et al., 2011). Este método poderá ser utilizado na interpretação do embasamento de bacias sedimentares extensas, como as bacias intracratônicas brasileiras, e da descontinuidade de Mohorovičić.

Metodologia

Modelagem direta

O potencial gravitacional e suas primeiras e segundas derivadas causados por um tesseróide são dados em Wild-Pfeiffer (2008). Porém, não há solução analítica para estas relações e portanto métodos numéricos de integração devem ser utilizados. Asgharzadeh et al. (2007) propõe a utilização da Quadratura Gauss-Legendre para a integração numérica. Este método consiste em discretizar o integrando em pontos correspondentes a raízes de polinômios de Legendre e aproximar a integração por uma soma ponderada (Hildebrand, 1987).

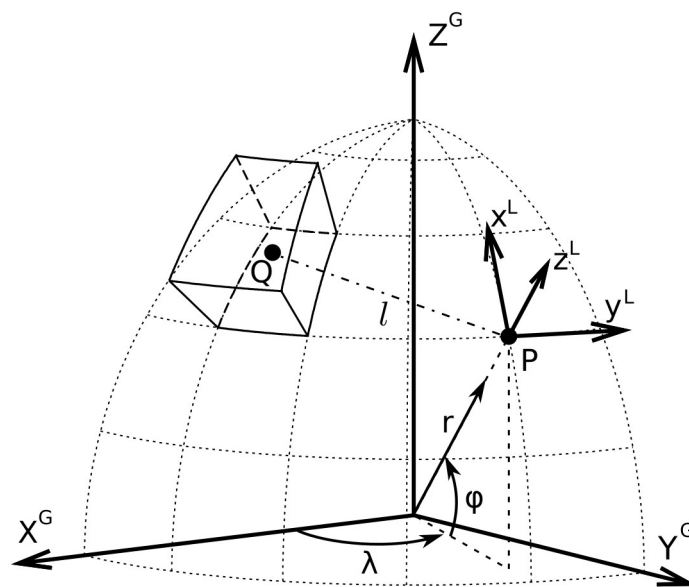


Figura 1: Representação esquemática de um tesseróide no sistema de coordenadas geocêntrico (G) e o ponto de observação P com o sistema local (L) correspondente.

Modelagem inversa de corpos geológicos

Se discretizarmos a subsuperfície em tesseróides justapostos horizontalmente e verticalmente, podemos aproximar o efeito gravitacional de corpos geológicos complexos

pela soma dos efeitos gravitacionais de todos os tesseroides. Considerando que cada tesseróide possui um contraste de densidade homogêneo, a relação entre o efeito gravitacional e os contrastes de densidade é linear e pode ser escrita em notação matricial como

$$\mathbf{d} = \mathbf{G} \mathbf{p} \quad , \quad (1)$$

em que \mathbf{d} é o vetor de dados preditos, \mathbf{G} é a matriz Jacobiana da relação funcional entre os dados preditos e os contrastes de densidade e \mathbf{p} é o vetor de parâmetros que contém os contrastes de densidade de cada tesseróide.

O algoritmo de inversão utilizado será uma adaptação para tesseróides do método desenvolvido por Uieda e Barbosa (2011). Este método consiste em crescer a solução em torno de tesseróides previamente definidos denominados “sementes”. O crescimento é feito incorporando novos tesseróides em torno das sementes de forma a obtermos corpos geológicos compactos (sem buracos em seu interior). Matematicamente, este problema consiste em minimizar a função objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \phi(\mathbf{p}) + \mu \theta(\mathbf{p}) \quad , \quad (2)$$

em que a função $\phi(\mathbf{p})$ é uma medida do desajuste entre os dados observados e preditos. Esta função $\phi(\mathbf{p})$ pode ser a norma L1 ou L2 da diferença entre os dados observados e preditos (resíduos). A compacidade da solução é garantida através da utilização da função regularizadora

$$\theta(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^M \frac{p_i}{p_i + \epsilon} l_i^\beta \quad , \quad (3)$$

em que l_i é a distância entre o i-ésimo tesseróide do modelo interpretativo e a semente a qual ele será incorporado e ϵ é um número positivo pequeno .

Modelagem inversa do relevo de uma interface geológica

Seja o relevo de uma interface geológica definido como o desvio desta interface de um

nível de referência, é possível aproximar o efeito gravitacional deste relevo discretizando-o em M tesseroides justapostos horizontalmente. Nos referiremos a este conjunto de tesseroides como “modelo interpretativo”. Se fixarmos a base destes tesseroides no nível de referência e assumirmos um valor de contraste de densidade fixo, o efeito gravitacional d_i no i -ésimo ponto de observação produzido pelo conjunto de M tesseroides será função somente da espessura de cada tesseróide

$$d_i = \sum_{j=1}^M f_i(p_j) \quad i=1, \dots, N, \quad (4)$$

em que p_j é a espessura do j -ésimo tesseróide e $f_i(p_j)$ é a função não linear que relaciona o efeito gravitacional no i -ésimo ponto de medição com a espessura do j -ésimo tesseróide. Neste problema inverso os parâmetros a serem estimados são as espessuras dos M tesseroides, i.e., p_1, \dots, p_M .

Formulamos o problema inverso de estimar o relevo da interface geológica a partir de dados gravimétricos como a minimização da função objetivo

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \|\mathbf{d}^o - \mathbf{d}\|^2 + \mu \sum_k \lambda_k \theta_k(\mathbf{p}), \quad (5)$$

em que \mathbf{p} é o vetor de parâmetros a ser estimado, \mathbf{d}^o é o vetor de dados observados, μ é um parâmetro de regularização, θ_k é uma função regularizadora e λ_k controla o peso da k -ésima função regularizadora. As funções regularizadoras que serão utilizadas incluem a de Tikhonov de ordem 1, que impõe suavidade a interface (Barbosa et al., 1997), e de variação total (Martins et al., 2011), que impõe descontinuidades a interface. Desta forma é possível interpretar interfaces tanto com topografia suave como descontínua.

Viabilização da Pesquisa

A viabilização desta pesquisa consistirá nos seguintes itens:

1. **Equipamento:** Neste projeto de pesquisa desenvolveremos e aplicaremos algoritmos

que podem ser escritos em qualquer linguagem de programação científica. Os algoritmos desenvolvidos poderão ser executados em Linux ou outros sistemas operacionais (Windows, por exemplo). Em termos de equipamento, este projeto será desenvolvido usando os computadores disponíveis na própria instituição.

2. **Dados:** Os dados gravimétricos serão dados de satélite e do BNDG (Banco Nacional de Dados Gravimétricos).
3. **Experiência no exterior:** Em 2013, solicitaremos uma bolsa de doutorado sanduíche via CNPq ou CAPES. O local de execução deste doutorado sanduíche será definido até o final 2012.

Cronograma de execução

A Tabela 1 mostra um cronograma de execução deste projeto de tese que será desenvolvido de Agosto de 2011 a Julho de 2015 através das seguintes etapas de trabalho:

Etapas 1 - Elaboração do modelo direto

Será implementado computacionalmente a modelagem direta do potencial gravitacional e suas derivadas primeiras segundas utilizando tesseroides. A acurácia desta implementação será testada com base em soluções analíticas para a casca esférica. Será também analisado o erro de aproximação da Quadratura Gauss-Legendre e buscaremos formas de minimizá-lo.

Etapas 2 - Desenvolvimento da inversão de corpos

Nesta etapa adaptaremos a metodologia de Uieda e Barbosa (2011) para utilizar tesseroides e as demais componentes do campo gravitacional. Possíveis otimizações serão investigadas.

Etapas 2.1 - Testes com dados sintéticos

Utilizando o método desenvolvido na etapa 2 realizaremos testes com dados

simulados, contaminados com ruído, que sejam produzidos por estruturas semelhantes a soleiras, corpos salinos, intrusões, câmaras magmáticas, entre outros. Nesta etapa analisaremos numericamente a estabilidade da solução estimada considerando a influência dos seguintes fatores: nível de ruído nos dados; posição das sementes; presença de fontes com efeito gravitacional interferente; utilização de diferentes componentes do campo gravitacional, sozinhas ou em conjunto.

Etapa 2.2 - Aplicação a dados reais

O método desenvolvido será aplicado um conjunto de dados reais objetivando caracterizar um ou mais corpos geológicos de grande extensão, como soleiras ou grandes intrusões. Este conjunto de dados ainda não está definido, porém muito provavelmente será composto de dados de satélite e/ou do BNDG (Banco Nacional de Dados Gravimétricos).

Etapa 2.3 - Elaboração do primeiro artigo científico

Nesta etapa será elaborado um artigo científico com os resultados obtidos na etapa 2 do projeto. Além disto, os resultados serão divulgados em congresso nacional ou internacional.

Etapa 3 - Desenvolvimento da inversão de interfaces

Nesta etapa desenvolveremos um método de inversão para estimar o relevo de interfaces geológicas em coordenadas esféricas baseado na solução da equação 5. Nesta etapa serão investigadas otimizações computacionais que viabilizem a interpretação de conjuntos de dados extensos.

Etapa 3.1 - Testes com dados sintéticos

Utilizando o método desenvolvido na etapa 3 realizaremos testes com dados simulados, contaminados com ruído, que sejam produzidos por grandes interfaces geológicas, suaves ou abruptas, como embasamentos de bacias sedimentares ou a

descontinuidade de Mohorovičić. Nesta etapa analisaremos numericamente a estabilidade da solução estimada considerando a influência dos seguintes fatores: nível de ruído nos dados; estimativa inicial; profundidade da interface; utilização de diferentes componentes do campo gravitacional, sozinhas ou em conjunto.

Etapa 3.2 - Aplicação a dados reais

O método desenvolvido será aplicado um conjunto de dados reais objetivando caracterizar uma interface geológica de grande extensão, como o embasamento de uma bacia sedimentar continental ou a descontinuidade de Mohorovičić sob o território brasileiro. Este conjunto de dados ainda não está definido, porém muito provavelmente será composto de dados de satélite e/ou da rede fundamental.

Etapa 3.3 - Elaboração do segundo artigo científico

Nesta etapa será elaborado um artigo científico com os resultados obtidos na etapa 3 do projeto. Além disto, os resultados serão divulgados em congresso nacional ou internacional.

Etapa 4 - Período no exterior com bolsa de doutorado sanduíche a ser solicitada

Etapa 5 - Elaboração da versão escrita da tese de doutorado

Etapa 6 - Defesa da tese de doutorado

Etapas		2011	2012		2013		2014		2015
		2º Sem	1º Sem	2º Sem	1º Sem	2º Sem	1º Sem	2º Sem	1º Sem
	Disciplinas	X	X	X					
E1	Elaboração do modelo direto	X							
E2	Desenvolvimento da inversão de corpos	X	X						
E2.1	Testes com dados sintéticos		X	X					
E2.2	Aplicação a dados reais			X					
E2.3	Elaboração do primeiro artigo científico			X	X				
E3	Desenvolvimento da inversão de interfaces				X				
E3.1	Testes com dados sintéticos				X	X			
E3.2	Aplicação a dados reais					X			
E3.3	Elaboração do segundo artigo científico					X	X		
E4	Período no Exterior com Bolsa sanduiche					X	X		
E5	Elaboração da tese						X	X	X
E6	Defesa da tese								X

Tabela 1: Cronograma de execução.

Referências

- Asgharzadeh, M.F., Von Frese, R.R.B., Kim, H.R., Leftwich, T.E., Kim, J.W. , 2007, Spherical prism gravity effects by Gauss-Legendre quadrature integration. *Geophysical Journal International*, 169, 1-11.
- Barbosa VCF, Silva JBC, Medeiros W. E., 1997, [Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths](#). *Geophysics*, 62(6), 1745-1757.
- Hildebrand. F.B., 1987, Introduction to numerical analysis. Courier Dover Publications, 2. ed.
- Martins, C.M., Lima, W.A., Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., 2011, Total variation regularization for depth-to-basement estimate: Part 1 - Mathematical details and applications. *Geophysics*, 76 (1), 11-112.
- Tikhonov, A. N., 1963, Regularization of ill-posed problems: Doklady Akad. Nauk, SSSR, 153 , 49-52.
- Uieda L., Barbosa, V.C.F., 2011, 3D gravity gradient inversion by planting density anomalies. In: 73th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, 2011, Vienna. 73th EAGE - 2011, 2011. v. 1. p. 1-5.
- Wild-Pfeiffer, F., 2008, A comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *Journal of Geodesy*, 82 (10), 637-653.