



# USO DA INVERSÃO CONTROLADA DE CAMPOS GRAVIMÉTRICOS NA INTERPRETAÇÃO DE ESTRUTURAS TRI-DIMENSIONAIS COMPLEXAS

Roberto A. V. Moraes, Ph. D.

UnB/IGLGA - Brasil

Email: rmoraes@unb.br

## ABSTRACT

Gravity information is normally gathered with seismic data in petroleum exploration. As such, it is presented here a way to enhance the contribution of gravity fields not only in the prospecting effort but also in hydrocarbon reservoir management. It deals with a full 3D model inversion of gravity data, and is designed to improve the final match of a plausible geologic model anomaly to the measured one, a time consuming task if performed only by forward modeling. The inversion is for the geometry of the causative body, constrained to act on selected parts of this model. Test with the algorithm was carried out on the Galveston Island salt dome and proved useful in performing adjustments on an initial plausible model. Possible applications of this scheme could be: (i) the study of 3D structures using 2D seismic surveys (case study), and (ii) to help build a velocity model in typical 3D seismic survey.

---

## INTRODUÇÃO

Uma das possíveis aplicações dos chamados métodos potenciais em atividades da indústria do petróleo seria o uso da gravimetria na prospecção e no gerenciamento de reservatórios de hidrocarbonetos.

No primeiro caso, o avanço significativo que o imageamento sísmico em 3-D tem sofrido ultimamente, faz com que a gravimetria seja de utilidade em áreas onde este é difícil ou dispendioso. É o caso da prospecção em áreas de empurrão, no delineamento de alvos sob camadas de sal ou nos flancos de domos salinos recumbentes.

Com este objetivo, uma das formas de utilização da gravimetria poderia ser a que será aqui abordada. Baseia-se no uso de um algoritmo de inversão de dados gravimétricos distribuídos numa superfície qualquer, em termos da geometria de fontes anômalas tridimensionais complexas. A originalidade deste procedimento vem do fato de se tratar de inversão para geometria das fontes anômalas (problema não-linear) usando poliedros homogêneos (segundo Pohanka, 1988) como modelos. A escolha desta técnica como motor do modelamento, relaciona-se à sua perfeita adequação à geometria dos modelos sísmicos detalhados e ao fato dela permitir, igualmente, modelar propriedades físicas simplesmente dividindo-se os poliedros em regiões tetraédricas (Moraes, 1997). Esta aproximação difere assim, de outras que objetivam a inversão paramétrica do campo medido (problema linear), onde se procura encontrar em subsuperfície, no caso, uma distribuição de densidades em células paralelepípedicas ou cúbicas que o explique (ver, p. ex., Li e Oldenburg, 1996).

Para melhor superar as limitações inerentes a esquemas de inversão semelhantes, prevê-se aqui sua aplicação em modelos estruturais os mais controlados possíveis usando-se, dessa forma, regularização de Tikhonov (Zhadnov, 1993; Glasko et al., 1987 entre outros). Portanto, espera-se que hajam informações apriorísticas suficientes para controlar os modelos de tal forma que partes destes fiquem completamente imobilizadas (congeladas), enquanto outras possam ser modificadas, permitindo o casamento do campo anômalo do modelo aquele observado. Usado com os devidos cuidados este procedimento pode levar a inversões relativamente únicas face ao modelo geológico de melhor plausibilidade local.

O interesse na formulação do presente algoritmo vem da constatação que mesmo quando a interpretação é feita sobre modelos tridimensionais relativamente simples há sempre muitos graus de liberdade em jogo. Modelos da complexidade que o algoritmo em discussão é capaz de processar, tornam o ajuste manual (modelagem direta) extremamente tedioso. Além disso, é muito difícil se conseguir a visualização real e em verdadeira grandeza destes modelos, o que torna o ajuste manual ainda mais difícil. Desta forma, o esquema proposto pode ser valioso quando se esta na fase dos ajustes finais (sintonia fina) do modelo, uma tarefa complicada e longa se feito apenas em termos de modelagem direta.

## FORMULAÇÃO

O esquema de inversão em questão esta baseado em: (i) num modelador direto usando formulação baseada em

poliedros homogêneos; (ii) numa expressão analítica para cálculo do Jacobiano e (iii) adotando-se como métrica do processo de minimização a norma L2 num espaço de Hilbert, num algoritmo de minimização baseado no método de Gauss-Newton com regularização por Marquardt (Moraes, 1997). A solução adotada foi aquela dos mínimos quadrados estruturado (More, 1978), expressa por:

$$\left( \frac{\underline{J}(\underline{p}_k)}{\sqrt{\lambda_k} (\underline{D}_k \cdot \partial^i)} \right) \underline{\delta}_k = \left( \frac{\underline{r}(\underline{p}_k)}{\underline{0}} \right)$$

onde  $\underline{J}$  representa o Jacobiano, avaliado aqui por uma expressão analítica;  $\underline{p}_k$  o vetor dos parâmetros;  $k$  o número da interação;  $\lambda_k$  é o passo de Marquardt, calculado em cada interação como um subproblema de minimização dentro do principal (More et al, 1980);  $\underline{D}_k$  é uma matriz diagonal de escala, dada por  $\|(\underline{D}_{diag})_i\| = \max_{1 \leq i \leq n} \{ \|j_i\|_1 \}$ ;  $\partial^i$  é um operador diferencial de ordem  $i$ ;  $\underline{\delta}_k$  é o vetor das correções aos parâmetros;  $\underline{r}(\underline{p}_k)$  é o vetor com os resíduos do ajuste entre o campo do modelo complexo e o campo medido (Moraes, 1997).

No presente caso este sistema de equações pode ser resolvido usando-se decomposição QR com pivotamento por colunas ou decomposição em valores singulares (SVD). Estas soluções embora mais lentas do que aquela com matriz do sistema baseada nas equações normais (que pode ser resolvida, p. ex., usando-se decomposição por Cholesky) tem maior estabilidade numérica, já que o número de condicionamento do sistema é a raiz quadrada daquele resultante das equações normais (Moraes, 1997).

A correção dos parâmetros a cada interação é feita de forma otimizada por  $\bar{p}_{k+1} = \bar{p} + \sqrt{\lambda_k} (v_k^T \cdot \bar{\delta}_k)$ , onde  $v_k^T$  é um vetor de pesos calculados como desvios uniformes entre [0,1] para cada elemento de  $\bar{\delta}_k$  (Moraes, 1997).

## APLICAÇÃO

O esquema proposto foi testado modelando-se por inversão a fonte da anomalia gravimétrica observada na Ilha de Galveston. Esta se localiza a cerca de 100 km ao sul de Galveston, Texas, EUA, na plataforma continental do Golfo do México.

A região onde se situa a anomalia em questão (um quadrado com cerca de 2500 sq. km) foi objeto de trabalhos geofísicos principalmente pela Exxon Exploration Company. O mapa Bouguer compilado esta região (Fueg, 1995) mostra um relevo em forma de uma superfície côncava fechada para SE, orientada grosseiramente NE-SW, mergulhando para SE com aplitude ao redor de 7 mGal. A anomalia associada ao domo salino está representada por um alto com cerca de 2,5 mGal de amplitude que se destaca na parte central da área de estudo.

Centradas nesta foram realizadas medições sísmicas (2-D) ao longo de seis linhas, grupadas em dois conjuntos de três perfis paralelos cada, que se cortam transversalmente. A interpretação destas permitiu que se mapeasse o topo e se tivesse uma idéia dos limites horizontais da estrutura salina. Os dados de poço e, em menor proporção, os sísmicos, permitiram a construção do modelo das camadas nas quais o domo se intrudiu. A integração dos dados de geometria e densidade possibilitou o estabelecimento do modelo com a distribuição das densidades válido para o local. Testes com modelamento gravimétrico direto mostraram que o domo em questão não possuiria raiz e assemelhar-se-ia mais a uma almofada de sal e possibilitou uma primeira sintonia na geometria do modelo interpretado.

Partindo-se destes resultados (Fueg, 1995), procurou-se verificar se o modelo geométrico final poderia ser otimizado pela técnica de inversão desenvolvida. A interpretação feita representa um dos objetivos a que este procedimento se destina, que é a interpretação de alvos com geometria 3-D, usando-se dados sísmicos 2-D como controle, pelo menos, da parte superior da estrutura salina e a gravimetria como auxílio à interpretação de sua base.

Os resultados desta inversão mostrou que o modelo de partida (Fueg, 1995) necessitava de ajustes na geometria da parte inferior da almofada salina e que esta seria, em realidade, mais espessa que inicialmente pensada e com limites horizontais mais amplos que os originalmente previstos (Figuras 1 e 2).

Este procedimento seria mais completo e objetivo se a inversão gravimétrica pudesse ser realizada conjuntamente com a sísmica. Neste caso lograr-se-ia um melhor controle sobre a geometria final que deveria explicar não só o relevo gravimétrico como as informações sísmicas (versão mais evoluída daquela descrita na por Starich et al., 1994, p. ex.).

Outro uso em que esta técnica seria indicada, está na construção de modelos de velocidade, importantes ao processo de migração de dados sísmicos 3-D, quando se tenta imagear estruturas abaixo de níveis salinos. A inversão conjunta teria que justificar os dois campos geofísicos medidos. Se isto viesse a economizar pelo menos uma das várias

migrações necessárias até a obtenção do modelo mais plausível para as velocidades, seu uso já estaria justificado. Além destes, o esquema divisado pode ser adaptado à inversão magnética. Esta pode ser ainda realizada conjuntamente à gravimétrica (principalmente se o volume ocupado pelas duas propriedades físicas contrastantes for o mesmo) no estudo não só de alvos da indústria da mineração como também na de hidrocarbonetos onde o discernimento de estruturas vulcânicas intrudidas na seqüência sedimentar seja importante.

#### Referências

Fueg, J. E., 1995, *Three-dimensional gravity modeling of the Galveston Island Salt Dome in the Gulf of Mexico: EUA* (Golden, CO), Tese de Mestrado, Departamento de Geofísica, Colorado School of Mines.

Glasko, V. B., Mudretsova, E. A., e Strakhov, V. N., 1987, *Inverse problems in gravity and magnetometry; in: Ill-posed problems in the natural science: Rússia (Moscou), Mir Publisher, pp 115-129.*

Li, Y., e Oldenburg, W., 1996, *3D inversion of magnetic data: Geophysics, 61, 394-408.*

Moraes, R. A. V., 1997, *Constrained inversion of gravity fields for complex three-dimensional structures: EUA* (Golden, CO), Tese de Doutorado, Departamento de Geofísica, Colorado School of Mines.

More, J. J., 1978, *The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. Lecture notes in mathematics, Numerical Analysis: Proceedings of the Biennial Conference, Dundee, 06/28-07/01, Vol. 630, 1977, 105-116.*

More, J. J., Garbow, B. S., e Hillstom, K. E., *User guide for MinPack-1: EUA, Argonne National Laboratory, Applied Mathematics Division, Report ANL-80-74.*

Pohanca, V., 1988, *Optimum expression for computation of gravity field of a homogeneous polyhedral body: Geophysical Prospecting, 36, 733-751.*

Starich, P. J., Lewis, G. G., Faulkner, J., Standley, P. J. e Setterquist, S., 1994, *Integrated geophysical study of an onshore salt dome: The Leading Edge, 13, 880-884.*

Zhadnov, M. S., 1993, *Tutorial: Regularization in inverse theory: EUA* (Golden - CO), Colorado School of Mines, Pub. CWP-136.