



SBGf Conference

18-20 NOV | Rio'25

Sustainable Geophysics at the Service of Society

In a world of energy diversification and social justice

Submission code: RZRKAL5970

See this and other abstracts on our website: <https://home.sbgf.org.br/Pages/resumos.php>

Estimativa de deslocamento vertical via inversão gravimétrica 4D

Vinícius Crestanello (Programa de Pós-Graduação em Geofísica (CPGF/UFGA)), Cristiano Martins (Universidade Federal do Pará (UFGA))

Estimativa do deslocamento vertical via inversão gravimétrica 4D

Copyright 2025, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica / Society of Exploration Geophysicist.

This paper was prepared for presentation during the 19th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 18-20 November 2025. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 19th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

We present a reformulated 4D gravimetric inversion methodology designed to estimate vertical displacements from time-lapse gravity data. The approach is based on the premise that the gravimetric signal associated with subsidence can be obtained from the difference between 3D gravity responses at two distinct times. This assumption enables the construction of a time-sensitive sensitivity matrix that explicitly incorporates vertical mobility in the subsurface model.

To validate the method, we applied it to a synthetic model representing a horizontally layered body subjected to vertical displacement. The inversion results show that the proposed formulation is capable of accurately recovering the amplitude of the vertical movement, with relative errors below 1%. These results confirm the effectiveness of the methodology in reconstructing displacement patterns under controlled conditions.

Although the present study focuses on the validation of the method, future work will consider its application in more complex geological settings and acquisition configurations, such as volcanic calderas (terrestrial gravimetry), deep marine reservoirs (seafloor gravimetry), and large-scale tectonic displacements (satellite gravimetry).

Introdução

A subsidência e o soerguimento consistem em deslocamentos verticais causados por processos naturais ou antrópicos, como compactação de reservatórios, extração de fluidos e redistribuição de massa (Turcotte and Schubert, 2014; Watts, 2001).

A gravimetria 4D destaca-se por incorporar a dimensão temporal à análise do campo gravitacional, permitindo acompanhar a evolução de sistemas dinâmicos como reservatórios em produção (Alnes et al., 2010; Eiken et al., 2008). Em ambientes *offshore*, sensores no fundo marinho detectam pequenas variações de massa, ou de posição das camadas devido à subsidência (Fjær et al., 2008; Geertsma, 1973; Van Thienen-Visser et al., 2015).

A interpretação correta dos sinais gravimétricos requer compensar os efeitos da própria subsidência da base, que pode mascarar variações relevantes. Para isso, aplicam-se estratégias baseadas em modelagem geomecânica e inversão (Arelaro, 2020; Camp et al., 2017; Røste and Ke, 2017).

Este trabalho propõe uma nova formulação de inversão gravimétrica 4D, com mobilidade vertical no modelo, estimando deslocamentos a partir da diferença temporal entre sinais gravimétricos 3D. A metodologia é validada com simulações sintéticas sob condições controladas.

Metodologia

Tipicamente, a inversão gravimétrica 3D estima um modelo $\mathbf{p}_k$ que minimiza o desajuste entre os dados observados $\mathbf{g}_{obs}$ e os dados preditos $\mathbf{g}_{calc} = \mathbf{A}\mathbf{p}_k$, e que simultaneamente atende à informação imposta pela regularização:

$$\Phi(\mathbf{p})_{3D} = \|\mathbf{g}_{obs} - \mathbf{A}\mathbf{p}_k\|^2 + \mu\|\mathbf{R}\mathbf{p}_k\|^2 \quad (1)$$

sendo $\mathbf{A}$ a matriz sensibilidade, $\mathbf{R}$ a matriz diferencial discreta de primeira ordem, e μ o parâmetro de regularização.

A solução do problema não linear da minimização de $\Phi(\mathbf{p})_{3D}$ é frequentemente obtida iterativamente utilizando-se o método de Gauss-Newton com a estratégia de Marquardt, até que um critério de convergência seja satisfeito.

Esta formulação 3D é adequada para um sistema estacionário, o que limita a aplicação em contextos com variação temporal de massa ou de geometria.

Para considerar mobilidade vertical do modelo, reformulamos o problema como uma inversão 4D. Assim, entre dois tempos distintos t_1 e t_2 , o vetor com os dados observados pela mudança da geometria do modelo fica definido por:

$$\Delta\mathbf{g}_{obs} = \mathbf{g}_{obs}(t_2) - \mathbf{g}_{obs}(t_1) \quad (2)$$

Como o dado predito 3D é $\mathbf{g}_{calc} = \mathbf{A}\mathbf{p}_k$, o dado predito 4D fica:

$$\mathbf{g}_{calc} = \mathbf{A}_2\mathbf{p}_k - \mathbf{A}_1\mathbf{p}_k \quad (3)$$

Então, o funcional a ser minimizado é:

$$\Phi(\mathbf{p})_{4D} = \|\Delta\mathbf{g}_{obs} - \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{p}_k\|^2 + \mu\|\mathbf{R}\mathbf{p}_k\|^2 \quad (4)$$

onde $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$, a formulação 4D é resolvida iterativamente utilizando a mesma metodologia empregada na inversão 3D.

Resultados

Teste de validação

Aplicamos esta inversão 4D em um modelo sintético de semi-espaco homogêneo, com uma camada retangular e homogênea, de densidade constante de $0,14 \text{ g/cm}^3$, de dimensões horizontais $20 \times 20 \text{ km}$ e 400 m de espessura. Discretizamos a camada em 20×20 prismas de $1 \times 1 \text{ km}$.

Para simularmos mobilidade vertical, no tempo t_1 o topo da camada estava em 100 m , e no tempo t_2 em 300 m de profundidade. A Figura 1 mostra os modelos nos instantes inicial (A) e final (B).

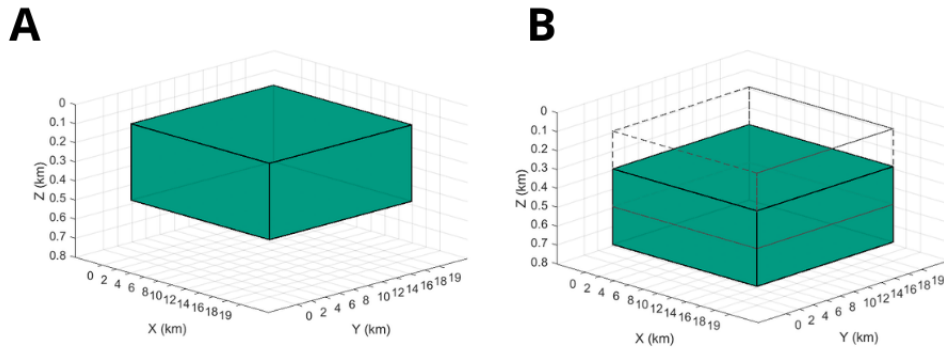


Figure 1: A) Modelo de camada plano horizontal no instante t_1 ; B) no instante t_2 .

A anomalia gravimétrica foi avaliada em uma grade de 30×30 pontos, espaçados em 1 km, com observações adquiridas a -0,5 m de altitude e distribuídas entre as posições -5 e 24 km nas direções horizontais x e y .

A Figura 2 apresenta os campos simulados. Note que ambas as anomalias são centradas, mas no instante t_1 (A), a anomalia tem amplitude de 0,32 mGal, e no instante t_2 (B), tem leve redução da amplitude e da frequência, correspondendo a corpo ligeiramente mais profundo. A amplitude do sinal da variação entre os dois instantes t_1 e t_2 (C) é da ordem de 0,5 mGal.

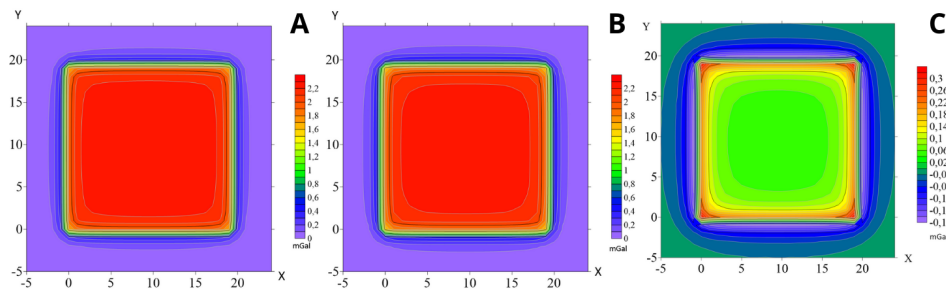


Figure 2: Campos simulados: (A) sinal da camada em t_1 ; (B) sinal da camada em t_2 ; (C) variação entre os dois instantes.

Para a inversão, utilizamos como aproximação inicial uma superfície plana localizada a 50 m de profundidade e parâmetro de regularização $\mu = 10^{-4}$. A Figura 3A mostra o deslocamento vertical estimado. Os valores estimados se aproximam de 200 m, com variação inferior a 1%, portanto com excelente concordância com o deslocamento verdadeiro realizado neste teste de validação. Esse resultado evidencia que a metodologia proposta é capaz de recuperar a amplitude do movimento vertical, validando seu uso na detecção de movimentos detectáveis por gravimetria 4D.

A Figura 3B mostra o campo residual obtido pela diferença entre os dados observados e os dados preditos. Nota-se que a magnitude dos resíduos permaneceu inferior a 0,001 mGal.

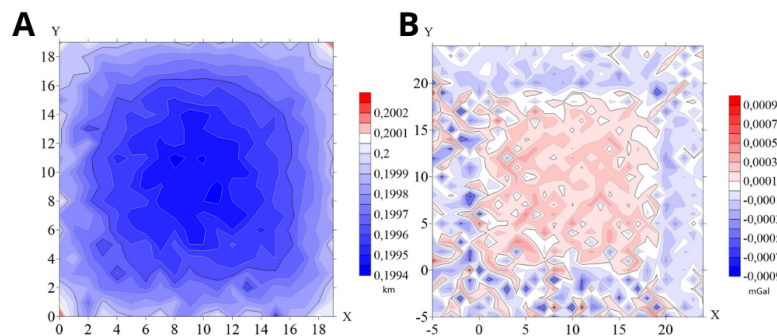


Figure 3: Resultados da inversão 4D: (a) deslocamento vertical estimado; (b) campo residual entre dados observados e preditos.

Conclusões

O resultado obtido com o experimento sintético de validação confirma que a reformulação da inversão gravimétrica 4D é eficaz em estimar deslocamentos verticais. Com base nesses resultados, considera-se promissora a aplicação futura da metodologia a modelos mais complexos. Pretende-se, em trabalhos futuros, realizar testes com diferentes disposições de malhas de observação sobre cenários simulando ambientes geológicos realistas, como: caldeiras vulcânicas (gravimetria terrestre), reservatórios submarinos (gravimetria de fundo oceânico) e movimentações tectônicas de larga escala (gravimetria satelital).

References

- Alnes, H., T. Stenvold, and O. Eiken, 2010, Experiences on seafloor gravimetric and subsidence monitoring above producing reservoirs: 72nd EAGE Conference and Exhibition-Workshops and Fieldtrips, European Association of Geoscientists Engineers, cp-161.
- Arelaro, A. D., 2020, Análise de sensibilidade de aquisição gravimétrica 4d de fundo oceânico: Master's thesis, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.
- Camp, M. V., O. de Viron, B. Meurers, T. van Dam, and P. Pajot-Métivier, 2017, Geophysics from terrestrial time-variable gravity measurements: Reviews of Geophysics, **55**, 938–992.
- Eiken, O., T. Stenvold, M. Zumberge, J. Bock, and G. Grandjean, 2008, Gravimetric monitoring of gas production from the troll field: Geophysics, **73**, WA149–WA154.
- Fjær, E., R. M. Holt, A. Raaen, et al., 2008, Petroleum related rock mechanics: Elsevier.
- Geertsma, J., 1973, Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs: Journal of Petroleum Technology, **25**, 734–744.
- Røste, T., and M. Ke, 2017, Use of field-wide sea-floor time-lapse gravity in history matching the mikkel gas condensate field: 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EURO-PEC 2012, European Association of Geoscientists & Engineers, cp-293.
- Turcotte, D. L., and G. Schubert, 2014, Geodynamics: Cambridge University Press.
- Van Thienen-Visser, K., J. Puijsma, and J. Breunese, 2015, Compaction and subsidence of the groningen gas field in the netherlands: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, **372**, 367.
- Watts, A., 2001, Isostasy and flexure of the lithosphere: Cambridge University Press.