



Separação gravimétrica regional-residual via modelagem crustal: exemplo na Bacia do Amazonas

Daniel Costa Miranda¹, Renata de Sena Santos¹, Raphael Di Carlo Silva dos Santos², Karina Palheta Gomes³

¹ Universidade Federal do Oeste do Pará

² Universidade Federal do Amazonas

³ Universidade Federal do Acre

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Neste trabalho aplicamos um método de separação regional-residual de dados gravimétricos utilizando a modelagem gravimétrica da descontinuidade de Moho na Bacia do Amazonas. Neste procedimento, assume-se que atributos como densidade e topografia são conhecidos. Utilizamos o modelo EIGEN-6C4 para a anomalia Bouguer da Bacia do Amazonas e dados do ETOPO1 para estimativa da topografia e a profundidade da Moho na plataforma sulamericana. Aplicamos a separação em dados Bouguer da Bacia do Amazonas e a comparamos com a separação regional-residual via análise espectral. Após o cálculo da anomalia residual modelamos o relevo do embasamento de um perfil e verificamos uma diferença de 1km entre os depocentros estimados pelos dois métodos. Comparamos as estimativas com a profundidade de poços e verificamos que a separação via modelagem crustal estimou com mais acurácia o relevo do embasamento.

Introdução

O método gravimétrico é um dos métodos mais utilizados na geofísica para delimitação de estruturas de bacias sedimentares propícias ao acúmulo de hidrocarbonetos (Silva et al., 2001). A anomalia gravimétrica Bouguer é resultado do somatório do sinal gravimétrico de cada estrutura geológica individual e para que possamos interpretar as estruturas-alvo é necessária a separação entre esses sinais. O sinal das bacias sedimentares, em geral, é negativo uma vez que o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento cristalino é negativo, contudo, sinais positivos podem estar associados a intrusões magmáticas ou à própria descontinuidade de Moho.

Dentre os métodos de separação existem os que separam o conteúdo espectral (Spector; Grant, 1970;), os que utilizam ajuste de polinômios (Beltrão et al., 1991; Abokhodair, 2011), e os que realizam análise de wavelet (Fedi; Quarta, 1998). Outra possibilidade é a utilização de modelagem crustal (Filho, 2017; Santos, 2019; Santos-Junior, 2019) para estimar a anomalia regional e subtraí-la da anomalia Bouguer. A modelagem crustal admite que a crosta é formada por prismas justapostos cujo topo de cada prisma é a cota topográfica e a base desses prismas é a profundidade da Moho. Aplicamos a modelagem

crustal na Bacia do Amazonas e adquirimos os dados Bouguer da bacia na plataforma ICGEM (Drewes et al., 2016), a topografia utilizando o modelo digital de elevação Etopo 1 (Amante; Eakins, 2019) e a profundidade da Moho utilizando a metodologia de Uieda e Barbosa (2016). Após a separação via modelagem crustal aplicamos também a separação via análise espectral e realizamos a modelagem direta do relevo do embasamento de um perfil da bacia para compararmos a eficácia dos dois métodos em estimar estruturas profundas. Verificamos uma diferença de 1km entre os depocentros estimados, contudo a modelagem direta utilizando os dados separados via modelagem crustal estimou um depocentro mais próximo da realidade com base em informações de profundidade de poços.

Modelagem gravimétrica crustal

Seja a crosta representada por um modelo de prismas tridimensionalmente contíguos e justapostos cujo topo dos é a topografia da superfície e a base é a descontinuidade de Moho. Discretizamos o volume da crosta contendo M prismas retangulares distribuídos nas direções x e y com contraste de densidade constante e conhecido entre a mesma e o manto (Figura 1). A função f_i que calcula a componente vertical do sinal gravimétrico na coordenada (x_i, y_i, z_i) produzida por um prisma tridimensional de densidade constante e conhecida ρ e volume infinitesimal $dx dy dz$ localizada na coordenada (x_j, y_j, z_j) é expressa por Blakely (1996)

$$f_i = G\rho \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z - z'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} dx' dy' dz', \quad (1)$$

onde G é a constante gravitacional, $x = x_i - x_j, y = y_i - y_j, z = z_i - z_j, x_1 = x - \left(\frac{dx}{2}\right), y_1 = y - \left(\frac{dy}{2}\right), z_1 = z - \left(\frac{dz}{2}\right), x_2 = x + \left(\frac{dx}{2}\right), y_2 = y + \left(\frac{dy}{2}\right)$ e $z_2 = z + \left(\frac{dz}{2}\right)$. As coordenadas (x', y', z') correspondem ao centro de um prisma. Para um conjunto de M prismas o valor da componente vertical da gravidade calculada na i-ésima coordenada (x_i, y_i, z_i) é dado por

$$g_i = \sum_{j=1}^M f_i(x_j, y_j, z_j), \quad (2)$$

onde $j = 1, 2, \dots, M$.

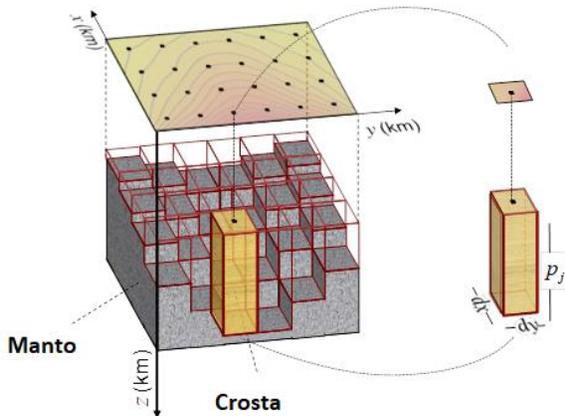


Figura 1 – Modelo interpretativo de um prisma tridimensional representando a crosta. Parâmetro p_j representa a espessura do j -ésimo prisma. Adaptado de Martins (2009).

Uma vez que a crosta é modelada, calculamos a anomalia gravimétrica devido ao conjunto de prismas, representando a anomalia regional (ou seja, $g_i = g_{regional}$). A diferença entre a anomalia Bouguer e a anomalia regional (Figura 2) é definida como a anomalia residual e é expressa por

$$g_{residual} = g_{Bouguer} - g_{regional} \quad (3)$$

A anomalia residual é responsável pela caracterização das heterogeneidades litológicas, geomorfológicas e estruturais como falhas, relevos, lineamentos e/ou intrusões em ambientes sedimentares ou cratônicos (Blakely, 1996; Al-Heety et al., 2017; Santos-Junior, 2019).

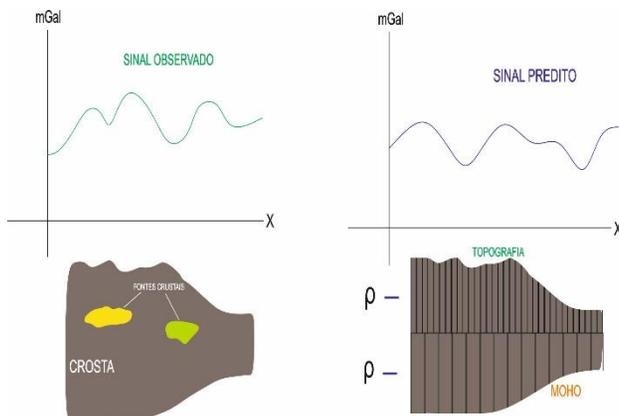


Figura 2 - Obtenção da anomalia gravimétrica calculada pela modelagem crustal. À esquerda temos o sinal observado referente às heterogeneidades da crosta. À direita temos o sinal gravimétrico predito (sinal regional) a

partir da crosta homogênea modelada por prismas. Adaptado de Santos-Junior (2019).

Área de Estudo

A bacia do Amazonas é uma bacia intracratônica paleozóica de 500.000km² situada entre os escudos pré-cambrianos da Guiana e Brasileiro, limitada pelo arco de Purus a oeste e pelo arco de Gurupá a leste (Figura 3). Sua origem está ligada à dispersão dos esforços com a propagação de um rift no sentido leste-oeste ao longo de zonas de fraqueza do embasamento proterozóico. A espessura do pacote sedimentar é estimada em torno de 6km formada por rochas paleozóicas, intrusões de diabásio triássicas-jurássicas e topo cretáceo-terciário, possuindo um sistema petrolífero não comercial denominado Barreirinha-Curiri (Damasceno, 2007). Na parte central da bacia, na região do talude conhecida como Cone do Amazonas, apresenta uma intensa tectônica gravitacional que estrutura toda a seção cenozóica por meio de falhas extensionais e falhas de empurrão na direção da bacia profunda (Filho; Costa, 1991). Ela apresenta três reservatórios: a) arenitos marinhos glaciais neodevonianos da formação Curiri, b) arenitos eólicos carboníferos da formação Monte Alegre e c) arenitos neocarboníferos da formação Nova Olinda.

A figura 4 mostra a profundidade da Moho para a região da Amazônia Central. O arquivo de dados da Moho é disponibilizado para toda a América do Sul com espaçamento 0.4° (Uieda e Barbosa, 2016). A figura 5 mostra o mapa topográfico do modelo ETOPO 1 e a figura 6 mostra o mapa Bouguer da bacia adquirido pelo modelo EIGEN-6C4 (European Improved Gravity Model for Earth By New Techniques) de dados satelitais disponíveis no ICGEM (International Center for Global Gravity Field Models). Ressaltamos que recortamos um polígono maior que a área da bacia para evitar distorções por efeitos de borda (Santos-Junior, 2019). Os dados Bouguer foram obtidos entre as longitudes -70° e -40° e latitudes 2° e -10° contendo 55094 estações espaçadas em 0,08° cada. Regridamos os dados em coordenadas UTM para garantir espaçamentos regulares das estações. A figura 7 mostra a anomalia regional estimada via modelagem crustal.

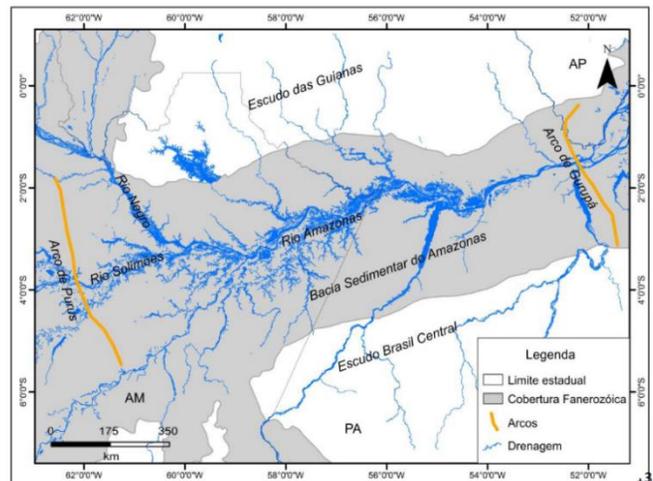


Figura 3 – Localização da Bacia do Amazonas. Modificado de Barbosa (2015).

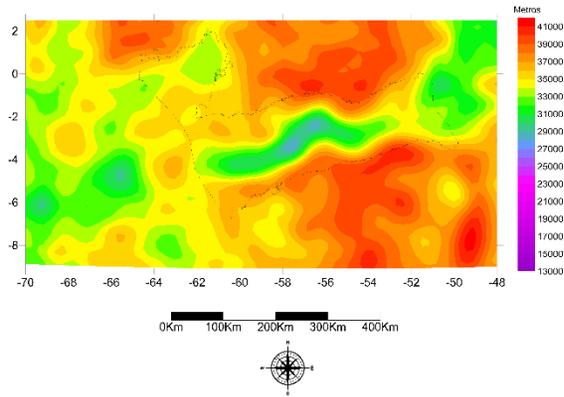


Figura 4 – Profundidade da Moho para a região da Amazônia Central. A Bacia do Amazonas se localiza no limite em preto.

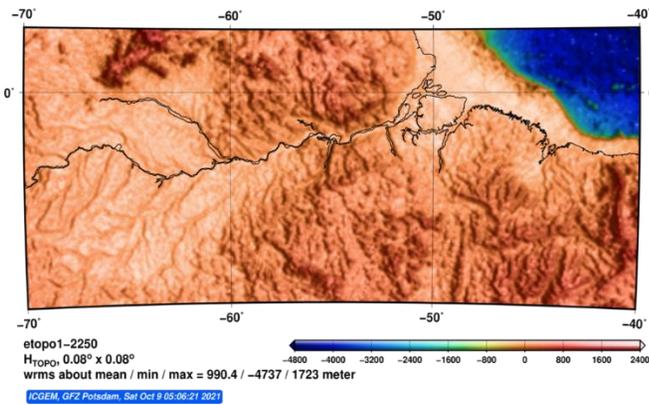


Figura 5– Modelo digital de terreno ETOPO1 para a região da Amazônia Central.

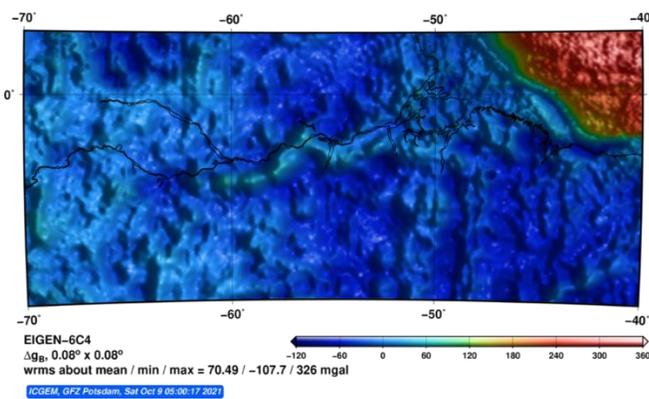


Figura 6 – Anomalia Bouguer da região da Amazônia Central a partir do modelo EIGEN-6C4.

Resultados e Discussões

A partir da metodologia proposta geramos o mapa gravimétrico regional (Figura 7). Para que retiremos a

influência da Moho subtraímos os mapas da figura 6 e 7 resultando na anomalia residual da figura 8. Adicionalmente aplicamos a análise espectral na anomalia Bouguer do modelo EIGEN-6C4 para realizar a separação da anomalia regional-residual. A figura 9 mostra a anomalia regional calculada através de um filtro gaussiano interativo e a figura 10 mostra a anomalia residual pela análise espectral.

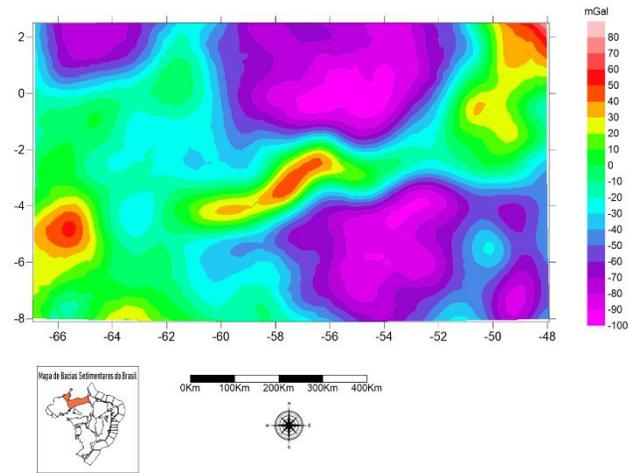


Figura 7 – Anomalia regional calculada via modelagem crustal.

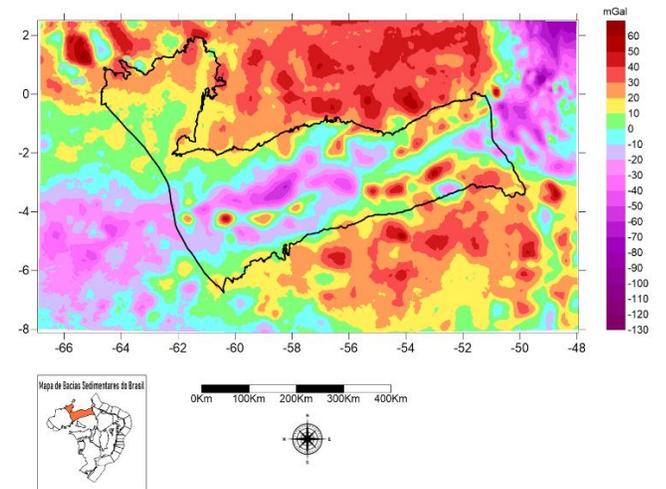


Figura 8 – Anomalia Bouguer residual resultado da diferença entre a anomalia Bouguer da bacia e a anomalia regional.

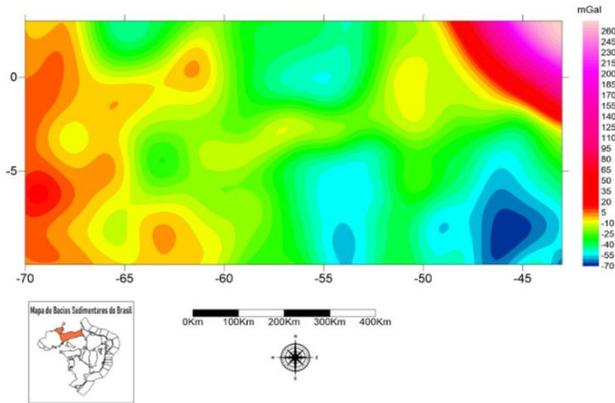


Figura 9 - Anomalia Bouguer regional resultado da análise espectral.

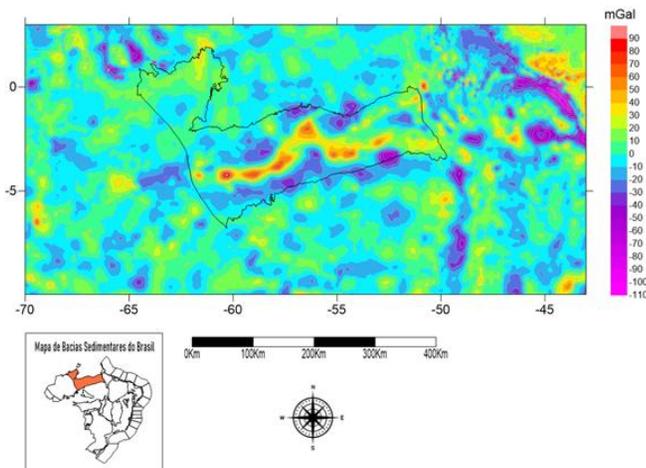


Figura 10 - Anomalia Bouguer residual resultado da análise espectral.

A partir dos dados gravimétricos residuais traçamos um perfil AB do poço 1-AM-1AM ao poço 1-UR-1-AM (Figuras 11a e 12a) para realizar a modelagem direta do relevo do embasamento. O poço 1-AM-1AM (nas coordenadas $-3,29^\circ$ e $-59,87^\circ$) possui 2,25 km de profundidade e alcança o embasamento em 2,23 km. Já o poço 1-UR-1-AM (nas coordenadas $-3,09^\circ$ e $-58,69^\circ$) não alcança o embasamento mas identifica a formação Ererê do Grupo Urupadi a 2,65 km de profundidade (Cunha et al., 2007). O Grupo Urupadi, em algumas regiões da bacia, alcança aproximadamente 4 km de profundidade e abaixo do Grupo Urupadi o embasamento pode alcançar quase 6 km de profundidade (Caputo, 2014).

A figura 11b mostra a modelagem direta do relevo do embasamento (linha preta na figura inferior) e o ajuste entre os dados residuais via modelagem crustal (cruzes em preto na figura superior) e o dado calculado (linha verde na figura superior). Estimamos um depocentro máximo de 5,5km e amarramos o valor de 2,5km ao começo do perfil referente a profundidade do poço 1-AM-1-AM.

A figura 11b mostra a modelagem direta do relevo do embasamento (linha preta na figura inferior) e o ajuste entre os dados residuais via análise espectral (cruzes em preto na figura superior) e o dado calculado (linha verde na figura superior). Estimamos um depocentro máximo de 4,5km. Amarramos um valor de aproximadamente 2km no começo do perfil para conseguir um ajuste.

Para ambos os modelos utilizamos um contraste de densidade constante de $-0,24\text{g/cm}^3$ com base nas informações de Nunn e Aires (1988). A modelagem gravimétrica direta utilizando os dados residuais da modelagem crustal mostrou um relevo do embasamento convergente com a informação de poço e um depocentro ultrapassando os 2,65km do grupo Urupadi enquanto que a modelagem direta utilizando os dados residuais da análise espectral não consegue convergir o ajuste dos dados na informação de poço e estima um relevo do embasamento mais raso.

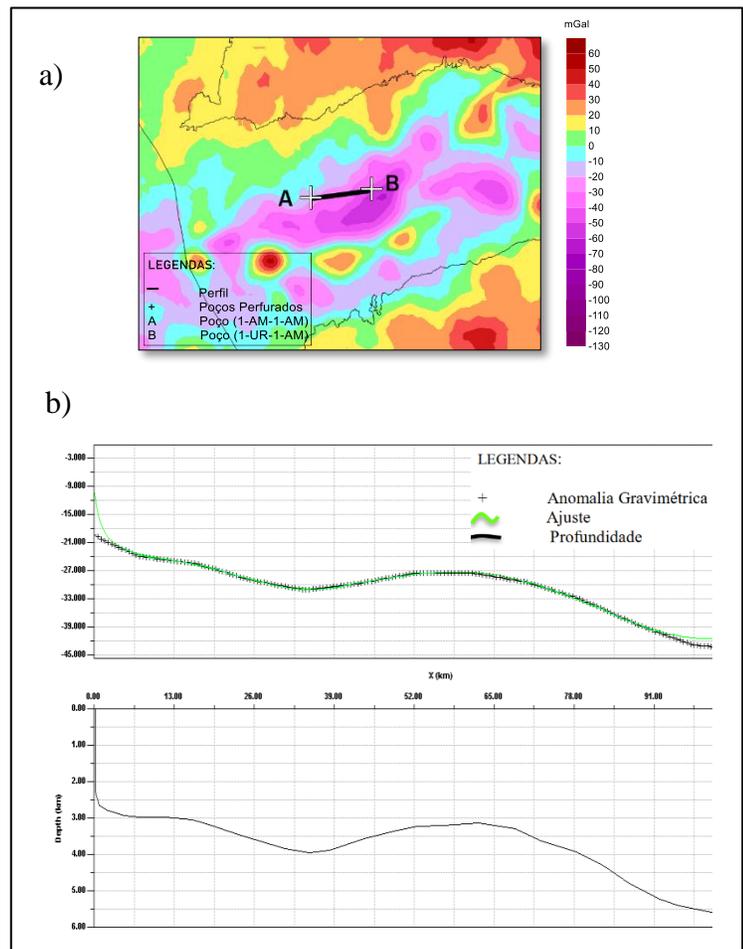


Figura 11 - a) Perfil gravimétrico AB de dados residuais via modelagem crustal. Os pontos A e B correspondem aos poços 1-AM-1AM e 1-UR-1AM, respectivamente. b) Relevo do embasamento estimado pela modelagem gravimétrica direta do perfil AB.

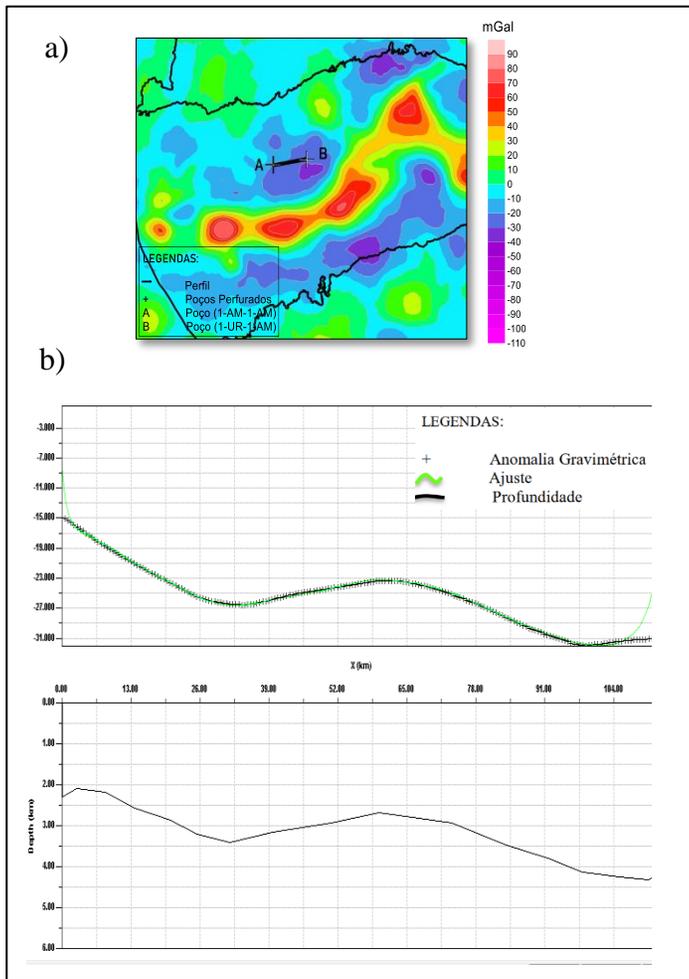


Figura 12 – a) Perfil gravimétrico AB de dados residuais via análise espectral. Os pontos A e B correspondem aos poços 1-AM-1AM e 1-UR-1AM, respectivamente. b) Relevo do embasamento estimado pela modelagem gravimétrica direta do perfil AB.

A Bacia do Amazonas apresenta poucas informações geofísicas comparadas a outras bacias brasileiras, mas estudos comparativos mostraram que a anomalia Bouguer indica a presença de massas densas resultantes de eventos magmáticos, ascensão do manto e afinamento da crosta gerando altos gravimétricos na porção central (Linsner, 1958; Bahia; Abreu, 1985). As anomalias residuais das figuras 10 e 8 mostram altos gravimétricos na porção central que podem estar associados a uma grande tectônica gravitacional que gerou um sistema de falhas extensionais (Costa, 2002) e consequentemente favoreceu a intrusão de derramamentos magmáticos.

Apesar de ambas as anomalias residuais mostrarem altos gravimétricos na porção central, a anomalia residual separada por modelagem crustal consegue delimitar os limites da bacia norte e sul enquanto a análise espectral apresenta baixos gravimétricos em regiões cratônicas. Isso atesta que os dados residuais via modelagem crustal

apresentam maior conformidade em função dos diferentes ambientes geológicos.

Conclusões

Apresentamos um procedimento de separação gravimétrica regional-residual para a Bacia do Amazonas utilizando modelagem crustal para eliminar o efeito da Moho. Utilizamos dados satelitais Bouguer da bacia para estimar a anomalia residual e modelamos o relevo do embasamento em um perfil.

Estimamos um depocentro de 5,5km em consonância com as informações obtidas na literatura, adicionalmente o dado residual conseguiu delimitar as bordas da bacia. Em comparação, calculamos a anomalia residual da bacia via análise espectral, modelamos o mesmo perfil e estimamos um depocentro mais raso de 4,5km, contudo o dado residual não delimitou as bordas da bacia inferindo anomalias negativas em ambientes cristalinos. A modelagem direta utilizou informação a priori da profundidade de poços na região para amarrar a profundidade do embasamento.

Para trabalhos futuros sugerimos a comparação da modelagem crustal com ajuste de polinômios e a utilização da inversão vinculada ao estabilizador de variação total para estimar estavelmente a profundidade do embasamento.

Agradecimentos

D.C.C. agradece a Universidade Federal do Oeste do Pará pela infraestrutura computacional.

Referências

Abokhodair, A.A. 2011. Constrained polynomial fitting for recovery of regional gravity. *Geophysical Prospecting*. v.59,n.4. p.749-759.

Al-Heety Ems; Al-Mufarji Ma.; Al Esho LH. 2017. Qualitative Interpretation of Gravity and Aeromagnetic Data in West of Tikrit City and Surroundings, Iraq. *International Journal of Geosciences*, v.8, n.2.

Amante, C.; Eakins, B. W.. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division, Boulder, Colorado, USA.

Bahia, R.R & Abreu, F.A.M., 1985. O rift do Amazonas - Sistema aulocógeno na plataforma amazônica, In: *Anais Segundo Simpósio de Geologia da Amazônia*, Belém, V. 1, p. 222-241.

Barbosa, R.O. 2015. Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários

- do arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central). Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 109f.
- Beltrão, J. F. ; Silva, J. B. C. ; Costa, J. C. 1991. Robust Polynomial Fitting Method For Regional Gravity Estimation. *Geophysics*. v. 56, n.1, p. 80-89.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University press.
- Caputo, M.V. 2014. Bacia Do Amazonas: Estratigrafia, Tectônica E Magmatismo. Relatório para Agência Nacional de Águas. Universidade Federal do Pará. 52f.
- Costa A.R.A. 2002. Tectônica cenozóica e movimentação salífera na Bacia do Amazonas e suas relações com a Geodinâmica das placas da América do Sul, Caribe, Cocos e Nazca. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará. Belém. 237 p
- Cunha, P.R.C.; Melo, J. H. G.; Silva, O. B. 2007. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 15, p. 227-251.
- Damasceno, A.C. 2007. Método sísmico aplicado às Bacias de Solimões e Amazonas. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 94f.
- Drewes, H., F. Kuglitsch, J. Adám, and S. Rózsa. 2016. The geodesist's handbook 2016: *Journal of Geodesy*, 90, 907.
- Fedi, M. and Quarta, T. 1998. Wavelet Analysis for the Regional-Residual and Local Separation of Potential Field Anomalies. *Geophysical Prospecting*, 46, 507-525.
- Filho, W. J.R.; Costa, J.B.S. 1991. Contribuições à evolução da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. In: III Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém (PA), p. 244-259.
- Filho, N.L.R. 2017. Anomalia gravimétrica residual da Bacia de Barreirinhas obtida a partir de modelagem crustal GEMMA. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 51f.
- Martins, C.M. 2009. Inversão gravimétrica do relevo 3D de bacias sedimentares e da variação da densidade usando informação a priori sobre o ambiente geológico. Tese (Doutorado em Geofísica) – Observatório Nacional, Rio de Janeiro. 130f.
- Nunn, J.A.; Aires, J.R. 1988. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere at middle Amazon Basin, Brazil. *Journal of Geophysical Research*. V.93, n.B1, p.425-428.
- Linsser, H., 1958. Interpretation of the regional gravity anomalies in the Amazonas. Relatório interno, Petrobras / Depex, Rio de Janeiro.
- Reguzzoni, M., Sampietro, D. 2013. Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data, *Geophys. J. Int.*, 195(1), 222–237.
- Santos, R.C. 2019. Mapeamento geofísico de heterogeneidades crustais utilizando campos potenciais. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém. 59f.
- Santos-Junior, G.C.C; Mendel, C.M.; Filho, N.R. 2019. Residual gravity anomaly of Brazilian Marajó Basin using crustal modeling: identifying structural and tectonic features. *Brazilian Journal of Geophysics*. Vol.37, n.2.
- Silva, J.B.C., Meideiros, W.E., Barbosa, V.C.F. 2001. Potential field inversion: choosing the appropriate technique to solve a geologic problem. *Geophysics*. 66, n.2, p. 511-520.
- Spector, A.; Grant, F. S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, v. 35, n. 2, p. 293-302.
- Uieda, L.; Barbosa, V. C., 2016, Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the south american Moho. *Geophysical Journal International*, 208, 162-176.