

Integração de métodos geofísicos na modelagem crustal na Bacia de Santos

Eduardo de Mio, Hung K. Chang e Fernando S. Corrêa LEBAC- Laboratório de Estudo de Bacias – UNESP – SP - Brasil

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

The Santos Basin is a passive margin basin generated during the Neocomian, associated with Gondwana breakup event. The thickness of the sedimentary package reach 15 km, including rift sequence deposited over a thinned crust which originally was 35 km thick. Crustal modeling was performed over 8 lines aiming to recognize the rift phase geometry and estimate the amount of crustal stretching. The database used was: four depth converted seismic horizons, magnetic and gravimetric grids and depth to magnetic basement data. The modeling results demand thick and widespread volcanic layers to fit the model. These wedge shaped volcanic fill, bordered with normal faults, are a common feature in rift basins. Four volcanic provinces have been defined, based on structural compartmentalization and regional occurrence of the basal rift layer, so called Sin-Rift I phase.

Introdução

A estrutura crustal da Bacia de Santos tem sido objeto de diversas discussões quanto à sua geometria, espessura e taxas de deformação (Leyden *et al.* 1971; Moriak & Dewey, 1987; Chang *et al.* 1992; França & Assumpção 2004). Kowsmann *et al.* (1982) apontam natureza essencialmente continental para a crosta sob a área do Platô de São Paulo, defronte às bacias de Campos e Santos, admitindo que as porções mais à leste do platô poderiam conter porções de crosta transicional, devido à presença de rochas magmáticas intrudidas.

Trabalhos de modelagem crustal baseados em métodos potenciais foram desenvolvidos para a Bacia de Santos por Guimarães *et al.* (1982) e Chang & Kowsmann (1984). Guimarães *et al.* (1982), utilizando-se de dados de anomalia gravimétrica *bouguer*, na região do Platô de São Paulo, observaram um gradiente positivo a partir do início do platô. Na área sobre o platô, os valores de anomalia *bouguer* se suavizam, aumentando novamente no limite platô – sopé continental. Este fato foi interpretado como resultante de um forte estiramento crustal na área próxima à charneira da bacia, com estiramento uniforme sob a área do platô, e um provável limite crosta continental – oceânica localizada na região do sopé continental. Estas características também foram evidenciadas por Chang & Kowsmann (1984), através da

análise dos valores de afinamento litosférico na região da bacia. Estes autores estimaram valores de afinamento litosférico (gama) de 0.1 até 0.7. Estes valores são compatíveis com os valores de estiramento crustal (beta) obtidos por Mio (2005).

Neste trabalho são apresentados os resultados de modelagem crustal utilizando-se dados de gravimetria, magnetometria além de dados de horizontes sísmicos em profundidade. Os resultados da modelagem são comparados com dados de profundidade do embasamento magnético obtidos com base na deconvolução de werner para fontes múltiplas (Braga *et al.* 2003). A Figura 01 apresenta a localização das linhas modeladas.

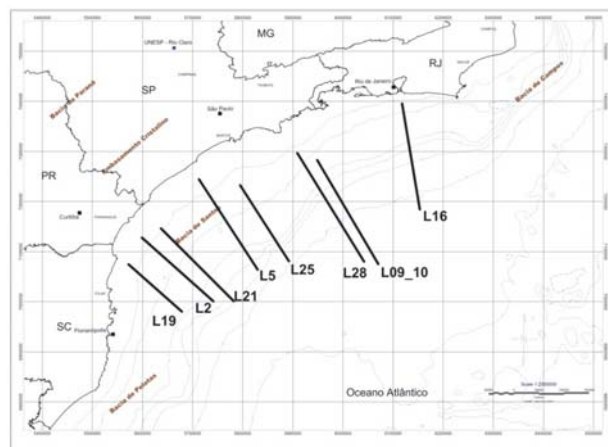


Figura 01. Localização das linhas onde foi realizada a modelagem crustal.

Métodos

Para realização da modelagem crustal foram utilizados dois conjuntos de dados distintos: dados de métodos potenciais, que consistem em perfis de magnetometria e gravimetria e dados de sísmica de reflexão representados por horizontes sísmicos em profundidade. Além disso, dados de profundidade do embasamento magnético da bacia, obtidos através da deconvolução de Werner para fontes múltiplas (Braga *et al.* 2003), foram utilizados de forma comparativa durante a modelagem (Mio, 2005).

Os perfis de gravimetria foram extraídos do mapa de anomalia *bouguer* crustal construído por Karner (2000). Este mapa foi produzido através de dados globais de anomalia *free-air* dos oceanos (Geosat) e do *grid* topográfico ETOPO5, com contraste de densidade entre sedimento e água da ordem de 1,17 g/cm³, utilizando uma malha de 2'x 2'. Além disso, foi subtraída uma superfície de tendência bi-cúbica, obtida por mínimos quadrados, para obtenção de um mapa de anomalia *bouguer* crustal, com remoção de efeitos superficiais

através da filtragem das altas frequências presentes no sinal (Karner 2000).

Para a magnetometria, foi utilizado o mapa magnético residual reduzido ao pólo. Este mapa magnético é proveniente de processamento e integração de vários levantamentos de épocas distintas, como os dados magnéticos do levantamento PRAKLA (1969) e dados dos levantamentos magnéticos obtidos durante campanhas de aquisição sísmica.

Para construção do modelo geológico foram ainda utilizados quatro horizontes sísmicos em profundidade, sendo eles: fundo do mar, base da seção rifte, base da seção evaporítica e base da seção pós-evaporítica da bacia.

Estes horizontes foram obtidos a partir do mapeamento regional das discordâncias crono-estratigráficas da bacia e da conversão tempo-profundidade. Como esta conversão depende essencialmente da “amarração” da sísmica com dados de poços é importante ressaltar que algumas porções da bacia não apresentam um ajuste satisfatório devido à inexistência de poços com controle de velocidade sísmica. A parte mais afetada por este tipo de problema são as áreas de águas rasas e de águas profundas a ultra profundas, onde o espaçamento entre os poços é muito grande. Outro problema é a qualidade da resolução sísmica no imageamento da fase rifte, bastante ruim na maioria das seções devido às grandes espessuras de evaporitos presentes na bacia.

Foram ainda utilizados, para comparação com os resultados obtidos com a modelagem, dados de profundidade do embasamento magnético, obtidos por Braga *et al.* (2003).

Neste trabalho, o espaço de acomodação da bacia foi dividido em diferentes pacotes: rochas vulcânicas, seqüência rifte, seqüência evaporítica e seqüência pós-evaporítica, além da coluna d’água. Tendo em vista, que a seção pós-evaporítica é composta principalmente por arenitos, folhelhos e carbonatos, cujas densidades médias são 2.35, 2.40 e 2.55 g/cm³ respectivamente (Telford *et al.* 1990), assumiu-se para esta seqüência a densidade média de 2.40 g/cm³. Para a seqüência rifte, que provavelmente comporta uma associação litológica semelhante, assumiu-se a densidade média de 2.50, um pouco maior que da seqüência pos-evaporítica, devido à seqüência estar em maior profundidade, o que ocasiona uma diminuição na porosidade por compactação e conseqüente aumento na densidade. Para a seqüência evaporítica foi utilizada uma densidade média de 2.20 g/cm³, correspondente à densidade da halita. Para a coluna d’água foi utilizado o valor de 1.03 g/cm³. Para toda seção sedimentar foi admitido o valor de susceptibilidade magnética igual a zero. Para crosta e manto foram utilizados os valores de densidade de 2.67 e 3.3 g/cm³, respectivamente. Para crosta assumiu-se valor de susceptibilidade magnética de 0.001 cgs (Carmichael 1982) e para o manto igual a zero.

A Figura 02 apresenta o modelo geológico inicial, construído com base nos horizontes sísmicos.

Para o cálculo da resposta magnética e gravimétrica do modelo geológico construído, foi utilizado o pacote GM-SYS[®] v. 4.7 for Windows, que representa a suíte de

modelagem do Oásis montajTM, produzido pela NGA (*Northwest Geophysical Associates*) para a plataforma Geosoft.

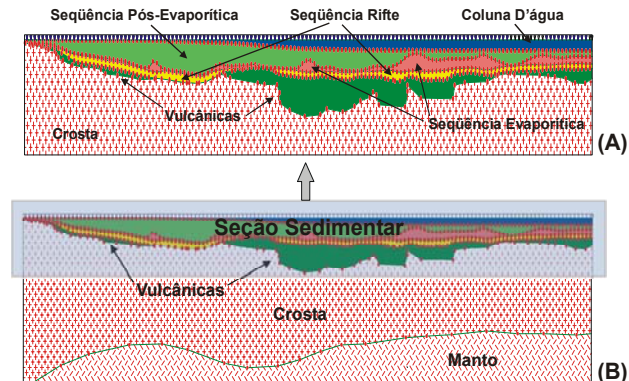


Figura 02. Exemplo de discretização do modelo geológico. (a) seção sedimentar dividida em seqüência rifte, seqüência evaporítica e seqüência pós-evaporítica, além da coluna de água. (b) divisão do modelo em seção sedimentar, vulcânicas, crosta e manto.

Resultados

Na modelagem crustal foi possível evidenciar um expressivo estiramento crustal na região de charneira, recorrente em toda a bacia. Este estiramento apresenta variações em magnitude, sendo que na charneira ocorre uma diminuição abrupta na espessura crustal que se mantém na região do Platô de São Paulo (Figuras 03 e 04). Outras feições importantes são os altos magnético e gravimétrico que ocorrem na charneira, com amplitudes que podem alcançar 300 nT e 70 mGals respectivamente, que foram interpretados como calhas do início da fase rifte, preenchidas pelo extenso vulcanismo que afetou a bacia nesta época. Estas falhas são responsáveis pela acomodação de grande parte da deformação dútil gerada pelo processo de rifteamento. A Figura 03 apresenta a linha 21, situada na parte sul da Bacia de Santos. Nesta linha é possível observar fortes anomalias magnética e gravimétrica na porção proximal, diminuindo em direção às porções distais da bacia. As anomalias gravimétrica e magnética proximais possuem aproximadamente 30 km de comprimento de onda, com amplitude de 50 mGals e 200 nT, respectivamente. Ambas curvas apresentam leve gradiente positivo em direção *offshore*, como resultado do afinamento crustal, e da presença extensiva de rochas vulcânicas na base da seqüência rifte. O estiramento crustal ocasionou, nesta porção da bacia, uma redução da espessura da crosta de aproximadamente 35 km na região de charneira, para valores da ordem de 15 km, na porção distal. A linha 09_10, localizada na porção centro-norte da bacia (Figura 04), apresenta uma anomalia magnética pronunciada no centro da linha com comprimento de onda em torno de 100 km, alcançando amplitudes da ordem de 300 nT. Na curva da gravimetria, também é possível notar o aumento gradativo dos valores em direção *offshore*, indicando, como na linha anterior, um aumento no estiramento crustal, com conseqüente diminuição da espessura. Este conjunto de anomalias foi ajustado através da alocação de duas profundas calhas (atingindo cerca de 15 km de

profundidade) preenchidas por rochas vulcânicas, que se estendem em direção *offshore*, praticamente até o final da linha.

Este padrão de diminuição de espessura crustal em direção *offshore* foi observado também em estudos crustais em áreas continentais adjacentes à Bacia de Santos (França & Assumpção 2004). Estes autores obtiveram valores de espessura crustal de 42 km na região da Província Mantiqueira e do Cráton do São Francisco, diminuindo para aproximadamente 35 km na região costeira. Isto implica em um baixo gradiente na região continental passando para um forte gradiente de estiramento na região de charneira da bacia, conforme evidenciado por Guimarães *et al.* (1982) e Chang & Kowsmann. (1984), e que foi também notado na modelagem aqui apresentada.

Para avaliação dos resultados da modelagem efetuada com dados sísmicos e métodos potenciais, foi realizada uma comparação entre estes e os resultados de profundidade do embasamento magnético, obtidos pela deconvolução de Werner para fontes múltiplas (Braga *et al.* 2003), objetivando a verificação da consistência do modelo geológico gerado. O topo do embasamento magnético obtido pela deconvolução de Werner para fontes múltiplas representa, na área em questão, o topo da seqüência vulcânica do início da fase rifte da bacia. Para isso, foram comparados dados de profundidade obtidos pela deconvolução de Werner em três linhas: a linha 16, no norte da bacia, a linha 25, na porção central e a linha 19 no sul como pode ser observado na Figura 05. Na linha 16 nota-se um ajuste regular entre o topo das vulcânicas e o topo do embasamento magnético na porção proximal da linha. A partir do centro da linha os valores obtidos pela deconvolução de Werner são mais profundos do que os da modelagem. Na linha 25, representativa da região central da bacia, observa-se um ajuste bastante satisfatório entre os dois conjuntos de dados, sendo que no último quarto da linha existe divergência nos valores, justamente na posição onde a espessura da seção evaporítica é expressivamente maior. A linha 19 é a que apresenta o melhor ajuste entre a modelagem e a deconvolução de Werner. Os dois conjuntos de dados seguem ajustados até o último quarto da linha na direção *offshore*, onde terminam as rochas vulcânicas modeladas: entretanto, a partir deste ponto, o embasamento granítico acompanha a curva resultante da deconvolução de Werner.

Conclusões

A modelagem crustal apresentou resultados bastante satisfatórios em relação às espessuras crustais obtidas e estruturas presentes na base da seqüência rifte da bacia, comumente com pouca resolução pela sísmica de reflexão. O estiramento crustal resultante do processo de rifteamento e implantação da bacia foi evidenciado de maneira satisfatória nas linhas modeladas e é coerente em termos qualitativos e quantitativos com modelo apresentado por outros autores (Guimarães *et al.* 1982; Chang & Kowsmann 1984). Além disso, a modelagem evidenciou a presença de calhas preenchidas por rochas vulcânicas na base da seqüência rifte, que seriam responsáveis pela acomodação da deformação resultante

do pulso inicial de rifteamento. Os resultados da modelagem destas rochas vulcânicas (base da seqüência rifte) foram comparados com dados preexistentes de profundidade do topo do embasamento magnético, obtidos pela deconvolução de Werner para fontes múltiplas, apresentando uma boa correlação entre os dois conjuntos de dados, principalmente na parte proximal das linhas, onde as fontes estão mais próximas. Na porção distal de duas das três linhas comparadas os resultados também foram satisfatórios.

Referências

- Braga, L. F. S.; Costa, C. M.; Gama, F.; Fontoura, C.; Cunha, A. S.; Dourado, F.; Correa, F. S. 2003. Magneto-Structural Imaging (MSI) and regional basement of the Santos Basin, Brazil. INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8, Rio de Janeiro, 2003. Rio de Janeiro, SBGf. V. P.1 CD-ROM.
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O. 1984. Subsidência térmica e espessura crustal na Bacia de Santos. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro, V. 2, P.1602-1614.
- Chang, H. K.; Kowsmann, R. O.; Figueredo, A. M. F.; Bender, A. A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, 213:97-138.
- França, G. S.; Assumpção, M. 2004. Crustal Structure of the Ribeira Fold Belt, SE Brazil, derived from receiver functions. *Journal of South American Earth Sciences*, 16:743-758.
- Guimarães, P. P. D.; Almeida, H. P.; Kowsmann, R. O.; Costa, M. P. A.; Boa Hora, M. P. 1982. Modelagem Gravimétrica na porção sul do platô de São Paulo e suas implicações geológicas. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador, 1982. *Anais*. Salvador, V. 5, P.1570-1575.
- Karner, G. D. 2000. Rifts of the Campos and Santos Basins, southeastern Brazil; distribution and timing. *AAPG Memoir*, 73:301-315.
- Kowsmann, R. O.; Costa, M. P. A.; Almeida, H. P.; Guimarães, P. P. D.; Boa Hora, M. P. 1982. Geologia Estrutural do Platô de São Paulo. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador, 1982. *anais*. Salvador, V. 4, P.1558-1569.
- Leyden, R.; Ludwig, W. J.; Ewing, J. 1971. Structure of the continental margin of Punta del Este, Uruguay, and Rio de Janeiro, Brazil. *AAPG Bulletin*, 55:2161-2173.
- Mio, E. 2005. *Modelagem crustal da Bacia de Santos pela integração de métodos geofísicos*. Rio Claro. 93 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista).
- Mohriak, W. U.; Dewey, J.F 1987. Deep seismic reflectors in the Campos Basin, offshore Brazil. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 89:133-140.

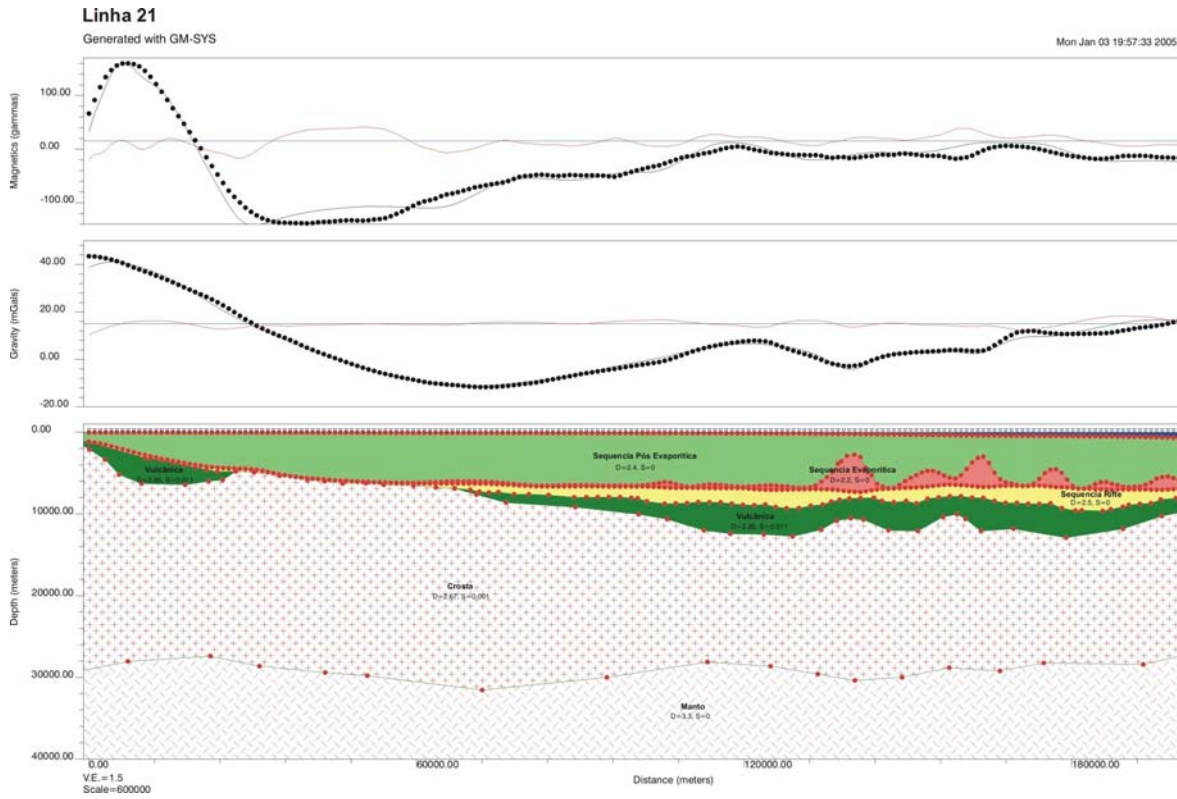


Figura 03. Modelagem crustal da linha 21, porção sul da Bacia de Santos. Notar a forte anomalia magnética na porção proximal da linha, ajustada através da utilização de uma calha preenchida por rochas vulcânicas.

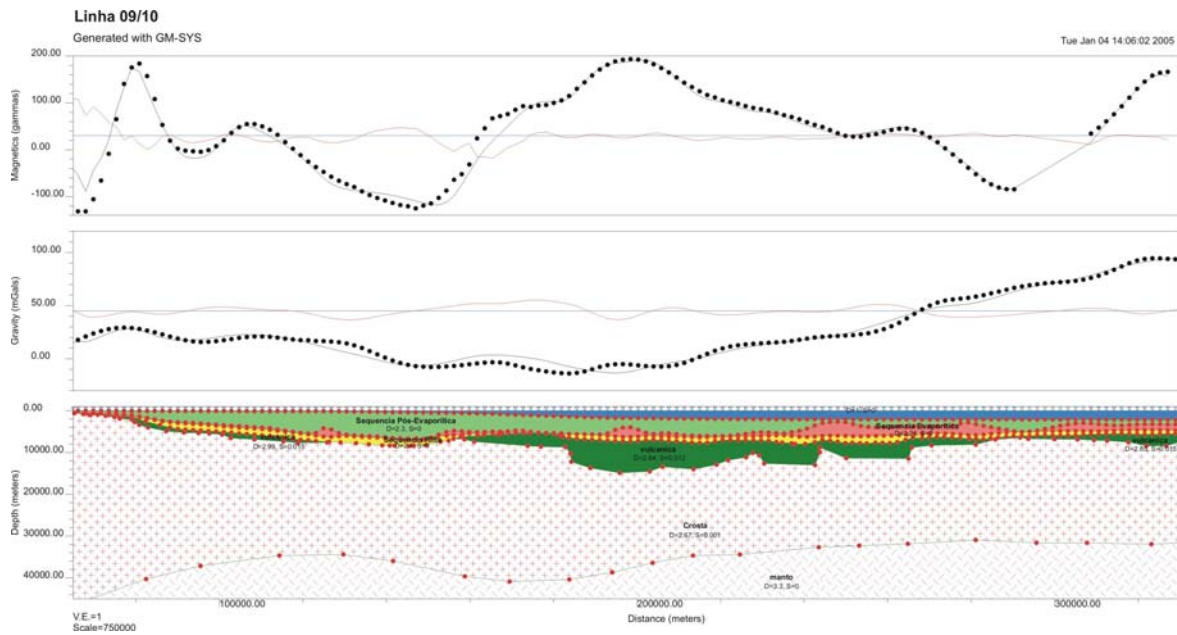


Figura 04. Modelagem crustal da linha 09_10, porção norte da Bacia de Santos. A ampla anomalia magnética na parte central da linha foi ajustada pela colocação de profundas calhas preenchidas por rochas vulcânicas. A partir do centro da linha, o perfil gravimétrico apresenta progressivo aumento, resultante da elevação do topo do manto pelo estiramento crustal

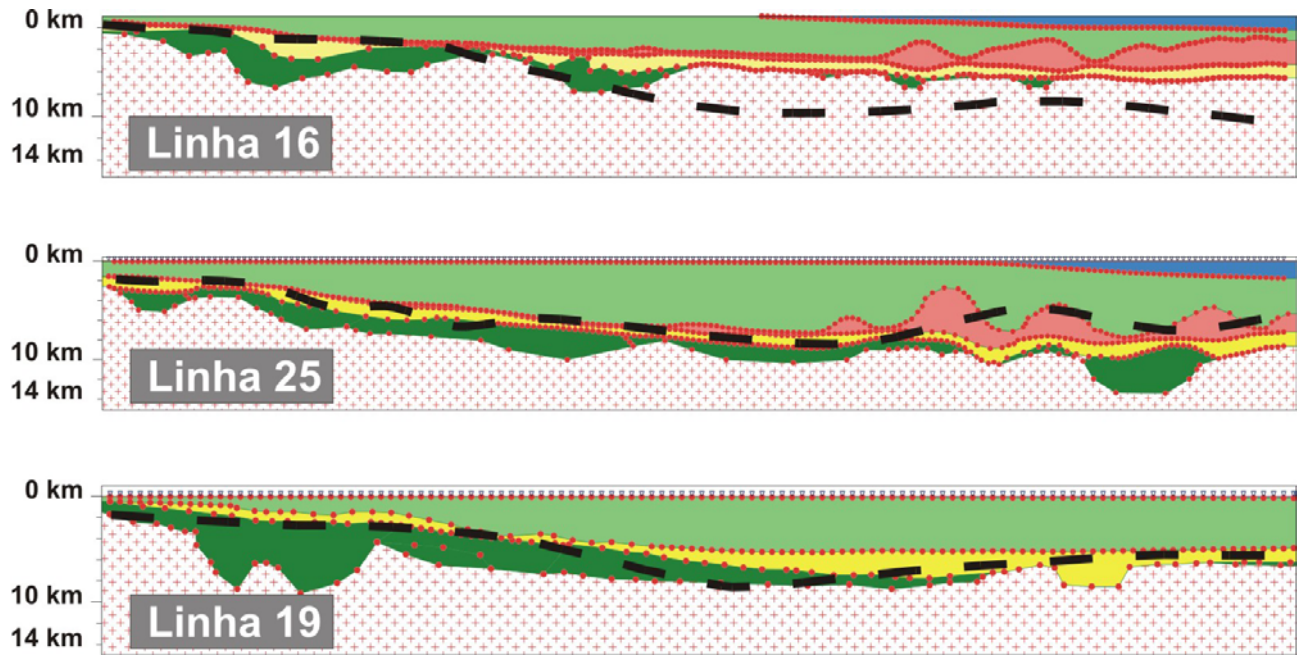


Figura 05. Comparação entre os resultados da modelagem crustal com métodos potenciais e a profundidade do embasamento magnético obtidos pela deconvolução de Werner. A linha preta tracejada representa os resultados do topo do embasamento magnético e em verde escuro as rochas vulcânicas modeladas.