



Inversão conjunta Sísmica/EM para sal alóctone

João Lucas Crepaldi*, Andrea Zerilli**, Tiziano Labruzzo**, Gustavo Basta dos Santos*, Marco Polo Buonora*
*Petrobras E&P-EXP/GEOF/MNS, **Schlumberger BRGC.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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

A complementaridade entre a alta resolução da Sísmica e a sensibilidade dos Métodos Eletromagnéticos (EM) à resistividade das rochas sugere que a integração entre estes métodos é de estratégica importância na interpretação exploratória. Através do presente estudo de inversão conjunta avaliou-se o ganho da integração Sísmica/EM para modelos sintéticos realísticos, visando mitigar as incertezas na caracterização corpos de sal alóctone. O êxito alcançado mostra que esta integração pode ser um avanço na redução dos riscos exploratórios em regiões que apresentam tal complexidade geológica.

Introdução

Existe uma demanda exploratória na melhoria do imageamento e caracterização geológica nas regiões de ocorrência de sal alóctone, com o intuito de suprir esta demanda, se avaliou o ganho da inversão conjunta Sísmica e Magnetotelúrica (MT), através de dois modelos sintéticos 2D, um de velocidade V_p , outro de resistividade horizontal ρ_h , baseados em um cenário realístico de ocorrência desse tipo de feição (Figura 1).

A partir desses modelos, as respostas sísmica e MT foram então calculadas através de algoritmos de modelagem computacional e contaminados com ruído gaussiano, simulando dados reais.

Primeiramente se inverteu apenas o dado sísmico, partindo-se de um modelo inicial com alguma informação *a priori*. Devido aos problemas de iluminação e ambiguidades inerentes ao método sísmico, o modelo de V_p recuperado apresenta grandes distorções abaixo dos corpos de sal alóctone (Figura 2).

Uma vez avaliada as deficiências da inversão sísmica na recuperação do modelo V_p abaixo dos corpos de sal, partiu-se para a inversão conjunta. Os dados sísmicos e MT foram então invertidos simultaneamente para todas as células livres (*image-based*) dos dois modelos: V_p e ρ_h ; com vínculos estruturais entre eles, recuperando-se a base dos corpos de sal e a região abaixo com maior fidelidade.

Para um maior refinamento da base do corpo de sal B_w , o resultado da inversão *image-based* foi então utilizado como *background* para a inversão poligonal *structure-based*, cujos parâmetros de inversão são as posições dos vértices da linha poligonal, que define a base do corpo de interesse, e a resistividade uniforme dentro do corpo, recuperando-se um modelo ainda mais próximo do verdadeiro.

Modelagem

As seções V_p e ρ_h (Figura 2) são modelos 2D baseados na interpretação sísmica, dados de poço e conhecimento geológico da área. Destaca-se que os corpos de sal alóctones apresentam $V_p=4500$ m/s, um contraste de 1.25:1 em relação ao meio encaixante na base, e $\rho_h=400$ $\Omega.m$, um contraste de 200:1 na base do sal.

A modelagem sísmica contou com um algoritmo de tomografia sísmica por tempo de trânsito usando diferenças finitas para resolver a Equação Isonal (Vsermirnova and Roslov, 2004), com uma alteração para *mesh* não regular adaptável à geometria de aquisição, batimetria e contrastes de velocidade. As respostas foram então modeladas para 51 *nodes*, espaçados de 1 km, nas mesmas posições dos receptores EM, com 511 fontes disparadas a cada 200 m, 5 m abaixo da superfície. Assim, a modelagem incluiu longos *offsets* necessários para se caracterizar grandes profundidades na sísmica de refração.

O MT é um método eletromagnético cujas fontes são predominantemente os campos EM naturais, gerados pela interação de partículas carregadas do vento solar com a magnetosfera terrestre (baixas frequências), além de fenômenos atmosféricos (altas frequências). Esses campos primários oscilantes interagem com as condutividades da subsuperfície, gerando correntes telúricas, cujos efeitos secundários são medidos por receptores de campo elétrico e magnético na superfície. No presente estudo de MT marinho, deve-se levar em conta o filtro passa-baixas exercido pela absorção do campo EM primário ao cruzar uma lâmina d'água de aproximadamente 2 km. Para tanto, foram então modeladas 17 frequências logaritmicamente espaçadas, num *range* de 0.00025 a 0.1 Hz. A modelagem MT utilizou um algoritmo de Elementos Finitos (Wannamaker et al., 1987) e derivadas de Fréchet segundo Rodi (1976) para receptores no leito oceânico, nas mesmas posições dos *nodes*, com o mesmo *mesh* da sísmica, uma vez que a resolução de ambos é similar, por se tratar de sísmica de refração.

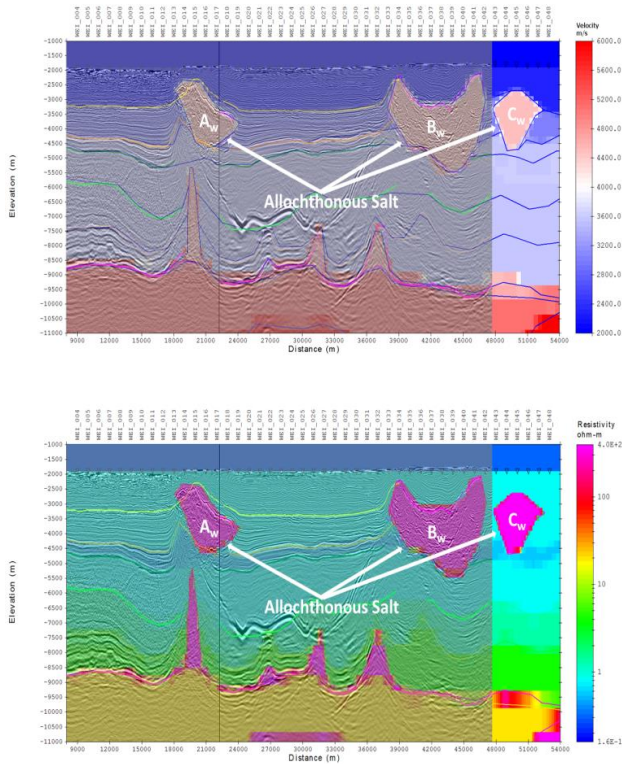


Figura 1: Modelos de propriedade em cores superpostos ao dado sísmico. (a) Acima, o modelo de V_p , os triângulos pretos equi-espaciaados junto ao leito marinho são os *nodes*. (b) Abaixo, o modelo de ρ_h , receptores EM nas mesmas posições de (a).

Inversões

A partir dos dados sísmicos e MT modelados, estes foram contaminados com ruído gaussiano a 3% do sinal, simulando dados reais. O dado sísmico foi então invertido, através de um algoritmo de minimização não linear Gauss-Newton, com regularização Tikhonov de 1ª ordem. Para a inversão utilizou-se o mesmo mesh não regular da modelagem, partindo de um gradiente vertical crescente como modelo inicial de V_p (Figura 2), com os valores de V_p livres para todas as células (*image-based*), exceto aquelas do topo dos corpos de sal, que entraram como vínculo a priori; uma vez que no caso real, este tipo de feição seria facilmente mapeada pelo imageamento sísmico.

O modelo final (Figura 4) apresenta velocidade satisfatória para os corpos de sal (~4000-4200 m/s), assim como para a parte mais rasa, conforme é permitido pela acurácia dos algoritmos de modelagem e cálculo das derivadas, assim como pela própria física do método sísmico. Entretanto, a base do sal e a região sub-sal foram considerados não satisfatórios, apresentando velocidades falseadas, chegando a conectar as anomalias do sal autóctone com o alóctone na base do modelo (Figura 4).

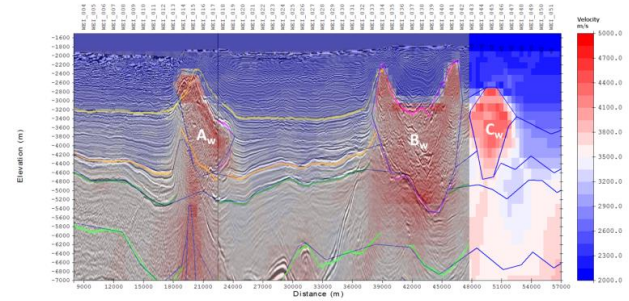


Figura 2: Resultado da inversão sísmica *image-based* para V_p . Observa-se o falseamento da base dos corpos de sal alóctone, assim como da região sub-sal.

A inversão conjunta consiste em se conjugar os dados sísmicos e MT no mesmo vetor de dados, tanto para o observado como para o calculado, conjugando-se também o vetor paramétrico com os valores de V_p e ρ_h , ambos atualizados simultaneamente pelo algoritmo de minimização Gauss-Newton. Uma vez que os jacobianos das medidas calculadas em relação às propriedades de cada modelo são independentes um do outro, os diferentes modelos são vinculados estruturalmente através da seguinte premissa: $\nabla m^{(1)} = \varphi \nabla m^{(2)}$ onde $m^{(1)}$ e $m^{(2)}$ são os vetores V_p e ρ_h respectivamente, e $\varphi = \varphi(\mathbf{x})$ é uma função escalar da posição (\mathbf{x}). Assim, o seguinte regularizador proposto por Zerilli (2002) é somado à função objetivo:

$$\min_{(m^{(1)}, m^{(2)})} \int_{\Omega} w_g \left| \frac{\nabla m^{(1)}}{\eta^{(1)}} + s \frac{\nabla m^{(2)}}{\eta^{(2)}} \right|^2 d\mathbf{x} \quad (1)$$

Onde $s = -\text{sgn}(\varphi)$ estabelece que os gradientes devam ser alinhados ou opostos, w_g é a matriz peso da regularização e $\eta^{(i)} = \max\{|\nabla m^{(i)}|, \eta_{\min}^{(i)}\}$, $\eta_{\min}^{(i)} > 0$ são as normalizações que tornam a soma adimensional e calibrada. Ao mesmo tempo, $\eta_{\min}^{(i)}$ é escolhido como um número pequeno de forma a evitar divergências numéricas, no caso de o gradiente ser quase nulo (Haber and Modersitzki, 2006).

Ao se analisar a expressão (1), entende-se que a minimização desse funcional faz com que as variações dos modelos V_p e ρ_h tendam a se alinhar, cumprindo o papel de vínculo estrutural e regularizador, que aliado à complementaridade na resolução, sensibilidade e iluminação entre os diferentes métodos. Tal técnica resulta em um ganho na caracterização das feições através da inversão conjunta em relação a cada método quando tratados separadamente, conforme apresentado na Figura 3.

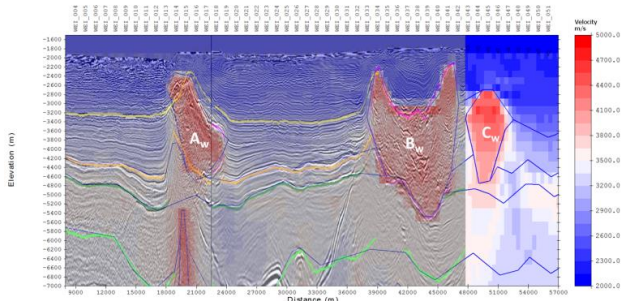


Figura 3: Resultado da inversão conjunta *image-based* para V_p . Observa-se o ganho na caracterização da base dos corpos de sal, assim como nas regiões sub-sal, recuperando-se a separação das anomalias do sal em relação ao “embasamento” resistivo.

Para um nível ainda maior de refinamento foi aplicada a inversão poligonal (*structure-based*) sobre a base do sal, contando com o *background* resultante da *image-based* como modelo *a priori*. Neste tipo de inversão, os únicos parâmetros livres são as propriedades físicas V_p e ρ_h dentro do corpo e as posições verticais dos vértices da linha poligonal que define a base do corpo (Figura 4). Assim, a minimização é muito mais focalizada e com menor custo computacional.

Conclusões

Nesse estudo de inversão controlada a integração Sísmica/MT representou um ganho significativo na caracterização da base corpo de sal alóctone, assim como na região abaixo. Primeiramente, através da inversão *image-based*, seguida de um refinamento ainda maior com a inversão poligonal. Tal ganho, no caso real, poderia ser aproveitado para a aplicação de *Reverse Time Migration* (RTM) ou mesmo para modelo inicial na *Full Wave Form Inversion* (FWI). Tal refinamento no imageamento sub-sal e seus entornos é de fundamental importância exploratória nessa região.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao grupo de interpretação da Petrobras na área, pelos insumos e sugestões, à Petrobras E&P-EXP/GEOF em cooperação com o grupo de Métodos EM da Schlumberger, pelo incentivo à pesquisa e desenvolvimento de novas metodologias na exploração.

Referências

Haber, E., and J. Modersitzki, 2006, Intensity gradient based registration and fusion of multi-modal images: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2006, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4191, 726-733.

Rodi, W. L., 1976, A technique for improving the accuracy of FE solutions for MT data: Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 44, 483–506.

Vsemirnova, E.A. and Yu.V. Roslov, 2004, Raytracing on irregular mesh: V International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Book of abstracts, p.68.

Wannamaker, P. E., J. A. Stodt, and L. A. Rijo, 1987, A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling, Geophys. J. R. Astr. Soc., 88, 277-296.

Zerilli, A, 2002, Integrated imaging adds values to complex structures exploration, “Near surface problems and solutions”, Society of Exploration Geophysicist 72nd Annual Meeting and Exposition, Salt Lake City, Utah, U.S.A.

Zerilli, A., Labruzzo, T., Zanzi, M., Buonora, M.P., Crepaldi, J.L., Menezes, P.T.L., 2014, Broadband marine CSEM: New benefits for subsalt and around salt exploration, Society of Exploration Geophysicist 84rd Annual Meeting and Exposition, 26-31 October, Denver, Colorado, 750-754.

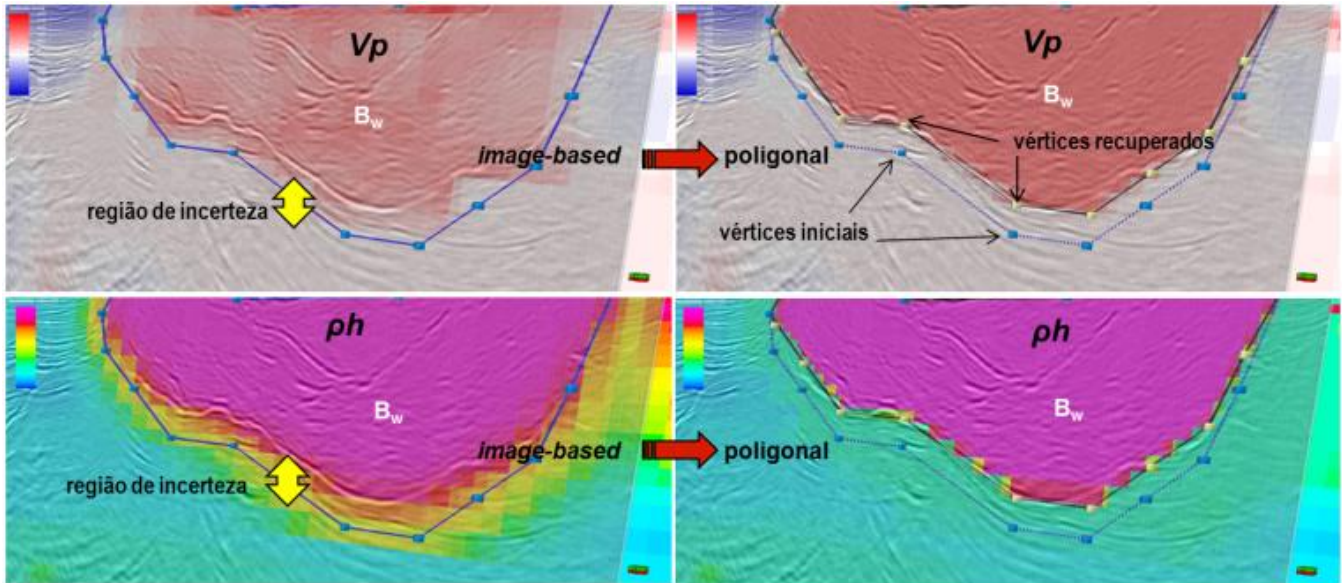


Figura 4: À esquerda são os modelos de V_p e ρ_h da inversão *image-based*, respectivamente. Observa-se a região de incerteza interpretativa para a base do sal. As figuras à direita são os resultados das inversões poligonais, que contaram com as *image-based* como *background*. Notar a posição da base do sal no modelo inicial e no recuperado pela inversão poligonal. Uma vez que os vértices estão amarrados entre si, o deslocamento vertical é o mesmo para todos eles, representando um único parâmetro de inversão; os outros dois parâmetros são V_p e ρ_h , uniformes dentro do corpo.