



## Aplicação da Tomografia de Tempos de Trânsito a Dados do Campo de Miranga, Bacia do Recôncavo

Vitor Hugo Serravalle Reis Rodrigues, IGEO/UFBA & CPRM; Amin Bassrei CPGG/IGEO/UFBA & INCT-GP

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> 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 14<sup>th</sup> 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

The growing global demand for hydrocarbons has tested the limits of oil exploration and exploitation technologies. Within the seismic methods, tomography is an alternative high resolution characterization of reservoirs, enabling a more efficient recovery of new as well as mature fields. In this work we apply the travelttime inversion in cross well data from Miranga Field, in the Recôncavo Basin, State of Bahia. The objective is to estimate the two-dimensional velocity distribution in the region between the two wells. We have used linearized inversion through the Levenberg-Marquardt scheme. The linear system during the iteration is solved by Conjugate Gradient method. Due to the ill-posedness we applied Tikhonov regularization of first and second orders, and the optimal regularization parameter was chosen using L-curve and  $\Theta$ -curve.

### Introdução

Após um século de existência da indústria do petróleo, muitas bacias antes prolíficas estão hoje em fase de declínio da sua produção de hidrocarbonetos. A Bacia do Recôncavo, a mais longeva em produção no Brasil, enfrenta o desafio de manter níveis econômicos de produção de petróleo décadas após atingir seu pico de produção, nos anos 1970. No seu atual nível de maturidade, os campos da Bacia do recôncavo exigem sofisticadas técnicas de recuperação secundária e terciária. Tais técnicas exigem um entendimento mais detalhado do substrato geológico que vão além daqueles oferecidos pela sísmica tradicional.

A tomografia sísmica integra o ferramental de soluções de imageamento de subsuperfície e tem melhor resolução do que o método sísmico tradicional, em parte pela possibilidade de uso de fontes de mais alta frequência. O ideal é que a aquisição seja feita com distribuição de fontes e receptores em torno do objeto a ser imageado. Na geofísica, no entanto, duas técnicas são mais utilizadas: *Vertical Seismic Profile* (VSP) onde as fontes são dispostas na superfície e os receptores ao longo de um poço, e *Crosswell Profile* (XWP), com fontes e receptores dispostos ao longo de poços distintos, a geometria usada neste trabalho.

De posse dos tempos de trânsito para vários pares de fonte e receptor, deve-se lançar mão de alguma técnica de inversão de dados para tentar se construir um modelo que represente a distribuição de velocidades das camadas geológicas.

Neste trabalho, a inversão de dados tomográficos do campo de Miranga, na Bacia do Recôncavo, é feita pela técnica de Gauss-Newton, e também com o uso das regularizações de Tikhonov (Tikhonov & Arsenin, 1977) de primeira e segunda ordens, o que vem a ser chamado método de Levenberg-Marquardt. A curva  $\Theta$  e a curva L são utilizadas como critérios de seleção do parâmetro de regularização ótimo. A solução do sistema de equações lineares, nas iterações do método de inversão linearizado, é obtida pelo método do Gradiente Conjugado.

### Aspectos geológicos

A Bacia do recôncavo é o compartimento mais ao sul do sistema de riftes abortados Recôncavo-Tucano-Jatobá. Com formato de hemigráben, a bacia possui área de aproximadamente 11.550  $km^2$  e depocentro com profundidades superiores a 6.5  $km$ . O arcabouço tectônico é dominado principalmente por falhas normais sintéticas e antitéticas.

É comum a subdivisão de seu pacote sedimentar em quatro supersequências: Paleozoica, Pré-Rifte, Sin-Rifte e Pós-Rifte, sendo que apenas as três últimas pertencem de fato à Bacia do Recôncavo. O estágio Pré-Rifte está associado à flexura da crosta ocasionada pelo início dos esforços distensionais. Essa megasequência é caracterizada por rochas siliciclásticas fluviais e fluvio-deltáicas depositadas em condições oxidantes. A supersequência Rifte ocorre quando do aumento da taxa de subsidência e é a de maior espessura, comportando sedimentos lacustres (siliciclástico e carbonáticos), e pacotes flúvio-deltáicos.

Seu principal sistema petrolífero é formado por folhelhos lacustres da formação Candeias (rocha geradora) e pelos arenitos da formação Sergi (Reservatório), ambos pertencentes à fase Rifte. Por causa da presença de falhas normais, rochas geradoras e reservatório costumam ficar posicionadas lateralmente. Folhelhos da porção basal da própria Fm Candeias, entre outras, fazem a função de rocha selante.

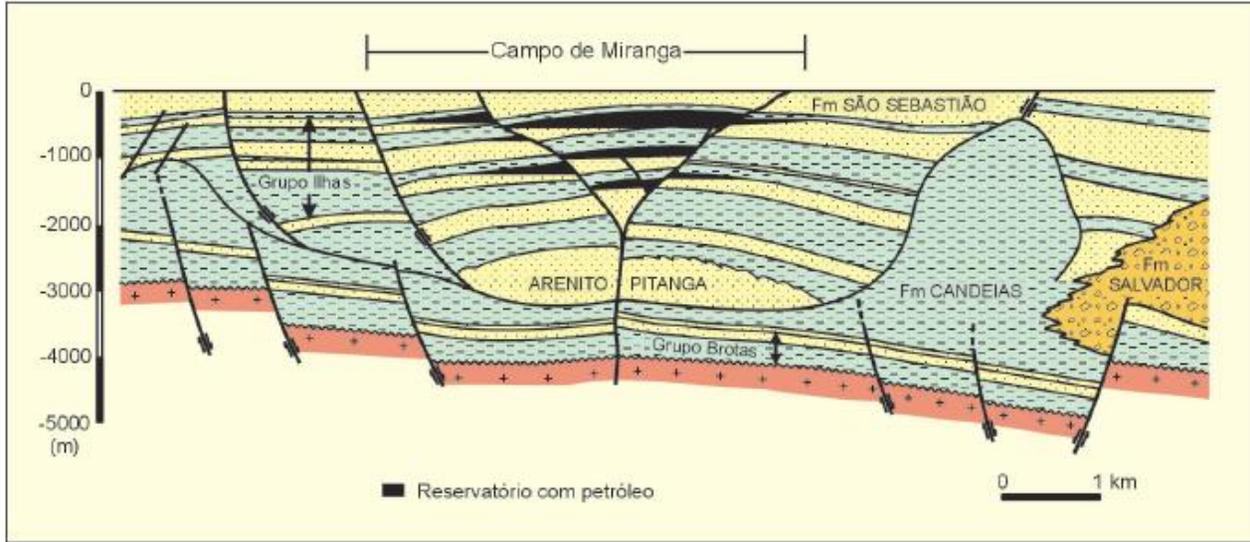


Figura 1: Seção geológica da porção central da Bacia do Recôncavo ilustrando a configuração estrutural-estratigráfica do Campo de Miranga (mod. de Sarnelli, 1988). Retirada de Milani e Araújo (2003).

Miranga, ilustrado na Figura 1, foi um dos primeiros campos encontrados com o apoio da sísmica no Brasil e possui reservas de óleo da ordem de 119 milhões de barris. A argilocinese foi um fator preponderante na configuração estrutural desse campo. Domos de argila da Formação Candeias circundam a região produtora e contribuíram para o controle das falhas normais da região. O reservatório é formado por arenitos do Grupo Ilhas, formações Marfim e Pojuca, estruturado como um anticlinal cortado por falhas normais com rejeitos entre 10 e 300 m.

O objetivo da aquisição tomográfica foi investigar o membro Catu-1 da Fm. Marfim a fim de se obter informações iniciais para o planejamento da recuperação secundária por injeção de CO<sub>2</sub>. Espera-se uma geologia bem comportada com camadas paralelas na região entre os poços da investigação tomográfica.

### Tomografia Sísmica e Problemas Inversos

A tomografia sísmica de tempos de trânsito considera tão somente o tempo de percurso do raio entre a fonte e o receptor, que pode ser dado pelo valor da seguinte integral:

$$t_i = \int_{R_i} s(x, z) dl, \quad i = 1, \dots, M,$$

onde  $R_i$  é o percurso do raio,  $M$  é o de pares fonte-receptor e  $s(x, z)$  a vagariedade do meio bidimensional no ponto  $(x, z)$ . Em um meio discretizado com  $N$  retângulos de mesmo tamanho a equação acima transforma-se em:

$$t_i = \sum_{j=1}^N g_{ij} s_j, \quad i = 1, \dots, M,$$

sendo que  $g_{ij}$  representa o tamanho do percurso percorrido pelo  $i$ -ésimo raio dentro do  $j$ -ésimo retângulo. O algoritmo de traçado de raios é baseado nas metodologias presentes nos trabalhos de Anderson e Kak (1982) e Lyte e Dines (1980).

Chama-se de modelagem direta a sintetização de dados a partir de um modelo conhecido e das leis físicas que regem o fenômeno em questão (Sneider e Trampert, 1999). O objetivo do problema inverso, ao contrário, é encontrar um modelo que seja capaz de produzir as mesmas respostas de um determinado dado obtido. A solução do problema pode não obedecer aos requisitos de *existência*, *unicidade* e *estabilidade*, o que o classifica como um problema mal posto.

Questões geofísicas frequentemente envolvem problemas com múltiplas soluções que exigem algum escrutínio e métodos matemáticos para escolha do modelo mais representativo.

### Métodos de Gauss-Newton e Levenberg-Marquardt

Métodos de inversão de escopo global tentam minimizar a função objetivo, erro entre dado real e o sintético, em todo universo de soluções, por outro lado, métodos de escopo local encontram soluções associadas ao mínimo local das funções objetivo. O método de inversão linearizada, ou método Gauss-Newton, é um procedimento de inversão iterativo e de escopo local.

Dado um problema não linear  $g(\mathbf{m})=\mathbf{d}$ , o método parte de um modelo inicial  $\mathbf{s}_0$  para com sucessivas iterações chegar a um modelo aproximado relacionado ao mínimo mais próximo da função objetivo  $\Phi(\mathbf{m})$ .

Desse modo, a expressão para atualiza o modelo corrente é:

$$(\mathbf{G}^T)^k \Delta \mathbf{d}^k = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^k \Delta \mathbf{m}^k,$$

onde  $\Delta \mathbf{m}^k = \mathbf{m}^{k+1} - \mathbf{m}^k$  é a atualização dos parâmetros do modelo estimada para a  $k$ -ésima iteração;  $\mathbf{G}^k$  é a matriz tomográfica para  $k$ -ésima iteração;  $\Delta \mathbf{d}^k$  é a diferença entre os tempos de trânsito observados e tempos de trânsito calculados para a  $k$ -ésima iteração. A extensão do método de Gauss-Newton com a introdução de parâmetros de amortecimento e/ou de regularização é apresentada como método de Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

### Algoritmo de Gradiente Conjugado

Rápido e eficaz, o método Gradiente Conjugado é um dos mais utilizados para resolução de sistemas lineares onde se tenha matrizes simétricas e positivo definidas. Seja o sistema de equações  $\mathbf{Ax} = \mathbf{y}$ , trata-se de um método iterativo cuja solução converge em menos de  $n$  iterações, sendo  $n$  a ordem da matriz  $\mathbf{A}$  do sistema. Por causa dos erros de arredondamento durante a computação numérica, a estimativa após o número de iterações  $x_n$  não será a solução exata, e sim uma boa aproximação da mesma (Hestenes e Stiefel, 1952).

Dado uma solução inicial  $\mathbf{x}_0$ , os passos do algoritmo Gradiente Conjugado para esse sistema são apresentados a seguir:

$$\mathbf{p}_0 = \mathbf{r}_0 = \mathbf{y} - \mathbf{Ax}_0$$

$$\alpha_i = \frac{(\mathbf{p}_i^T \mathbf{r}_i)}{(\mathbf{p}_i^T \mathbf{A} \mathbf{p}_i)},$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \alpha_i \mathbf{p}_i,$$

$$\mathbf{r}_{i+1} = \mathbf{r}_i - \alpha_i \mathbf{A} \mathbf{p}_i,$$

$$\beta_i = \frac{(\mathbf{r}_{i+1}^T \mathbf{A} \mathbf{p}_i)}{(\mathbf{p}_i^T \mathbf{A} \mathbf{p}_i)},$$

$$\mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{r}_{i+1} + \beta_i \mathbf{p}_i.$$

O critério de parada escolhido foi o módulo mínimo do resíduo  $\|\mathbf{r}_i\|$ , o processo iterativo é interrompido assim que um valor limite é atingido.

### Regularização

Na resolução numérica de problemas discretos mal-postos, técnicas de regularização são empregadas com o intuito de tornar a inversão mais estável. Essas técnicas permitem solucionar não o problema original, mas um problema equivalente e mais robusto com relação às variações nos dados de entrada (Oliveira, 2013). Neste trabalho, fez-se uso da regularização proposta por Tikhonov (1977).

A solução pela regularização por matrizes de derivadas obtida minimizando a função objetivo  $\Phi(\mathbf{m})$  é definida como sendo (Bassrei e Rodi, 1993):

$$\Phi(\mathbf{m}) = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \lambda L_n.$$

Na equação acima  $\lambda$  é uma constante positiva, chamada parâmetro de regularização, que controla o nível de

suavização da regularização;  $L_n = (\mathbf{D}_n \mathbf{m})^T \mathbf{D}_n \mathbf{m}$ , em que  $\mathbf{D}_n$  representa a matriz de regularização de Tikhonov de ordem  $n$ .

Para  $n = 0$ , a matriz  $\mathbf{D}_n$  corresponde à matriz identidade e diz-se que a regularização é de ordem 0. Na regularização de ordem 1 ( $n = 1$ ) a matriz  $\mathbf{D}_n$  é representada por:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ & & \vdots & \ddots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Quando  $n = 2$ , a regularização é de ordem 2 e representada pela matriz:

$$\mathbf{D}_2 = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \vdots & \ddots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}.$$

As matrizes acima aplicam as diferenças de primeira e segunda ordem ao vetor do modelo  $\mathbf{m}$ .

Partindo-se de um modelo inicial  $\mathbf{m}_0$ , a inversão linearizada com regularização de Tikhonov atualiza o modelo  $\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \Delta \mathbf{m}^k$ , sendo que  $\Delta \mathbf{m}^k$  dado pela equação:

$$(\mathbf{G}^T)^k \Delta \mathbf{d}^k = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{D}_n^T \mathbf{D}_n)^k \Delta \mathbf{m}^k.$$

Escolher bem a ordem da regularização e o valor do parâmetro de regularização é crucial para o sucesso da inversão. A curva L foi reintroduzida na literatura por Hansen (1992) como ferramenta para encontrar o parâmetro ótimo de regularização, em que estes estariam associados ao primeiro ponto de inflexão ou "joelho" da curva L. A partir desta, Santos et al. (2006) propuseram a construção de uma curva  $\Theta$  (Figura 2), que representa o cosseno dos ângulos entre segmentos adjacentes da representação discreta da curva L.

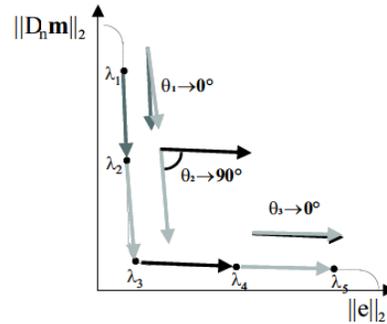


Figura 2: Estrutura ilustrativa da construção da curva  $\Theta$  a partir da curva L. Modificado de Santos et al. (2006).

A curva  $\Theta$  é uma ferramenta de escolha do parâmetro de regularização que permite a automatização do processo com algum grau de confiabilidade.

### Inversão com Dados Reais

A aquisição dos dados tomográficos é parte de um estudo envolvendo UFBA e Petrobras e foi realizada pela Schlumberger no campo de Miranga da Bacia do Recôncavo. Utilizou-se a geometria poço a poço ou XWP com disposição de fontes e receptores feita com um intervalo de aproximadamente 3m de profundidade.

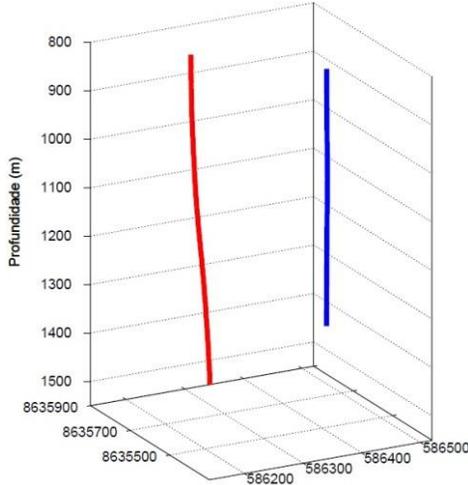


Figura 3: Representação tridimensional dos poços. Em vermelho o poço contendo as fontes e em azul, os receptores.

Um dos poços apresenta considerável desvio em relação com a vertical, conforme pode ser visto na Figura 3. Os dados coletados em poço passaram por um pré-processamento por parte da Schlumberger que incluiu: filtro passa-banda, remoção da *tubewave* e o *picking* dos tempos de trânsito. 16512 é o número de raios utilizados na inversão, são tempos de trânsitos não-nulos e sem erro de *picking*.

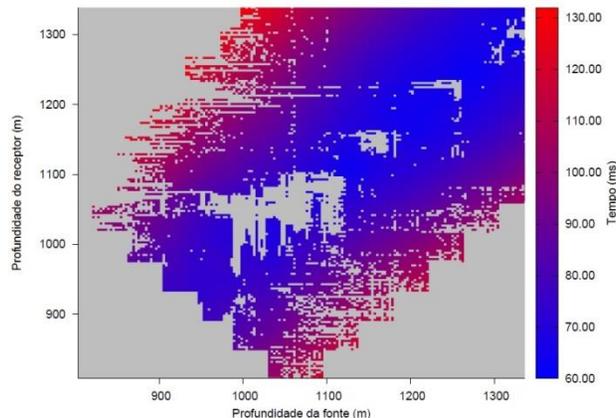


Figura 4: Diagrama de tempos de trânsito. A barra de cores indica o tempo em ms. Os valores nulos representados na cor cinza.

A Figura 4 mostra o mapa de cor dos tempos de trânsito. É possível perceber que há grandes vazios não iluminados, parte em função da rotina da aquisição e parte por falha de equipamento ou erros de *picking*.

A região de interesse foi dividida em 3780 blocos de dimensões 6 m x 6 m, 42 blocos na horizontal e 90

blocos na vertical. O modelo de partida para a inversão linearizada foi definido como um campo homogêneo de velocidade 3600 m/s.

Utilizou-se a análise da curva L, da curva  $\Theta$  e o critério da plausibilidade geológica para a escolha do parâmetro de regularização  $\lambda$  ótimo. Situações em que as curvas L e  $\Theta$  indicassem um valor de  $\lambda$  que levasse a disposições geológicas impossíveis foram descartadas e escolhidos parâmetros com valores próximos à região indicada.

### Discussão dos Resultados

As Figuras 5 e 6 mostram as curvas  $\Theta$  para regularizações de primeira e segunda ordem, respectivamente. Nas duas figuras, o ponto de inflexão relacionado ao mínimo da curva  $\Theta$  varia de acordo com a iteração, com as de primeira ordem apontando predominantemente para  $\lambda = 10^6$  e as de segunda ordem apontando para  $\lambda = 10^{10}$ . No entanto, nas curvas L correspondentes, esses valores do parâmetro de regularização não estão associados ao primeiro ponto de inflexão, como esperado, mas ao segundo. De qualquer modo, os valores de  $\lambda$  escolhidos estiveram sempre próximos às zonas de mínimo indicado pelas curvas  $\Theta$ , variando pouco entre iterações. Acredita-se que esse resultado divergente das projeções teóricas se deve à forte presença de ruídos nos dados coletados.

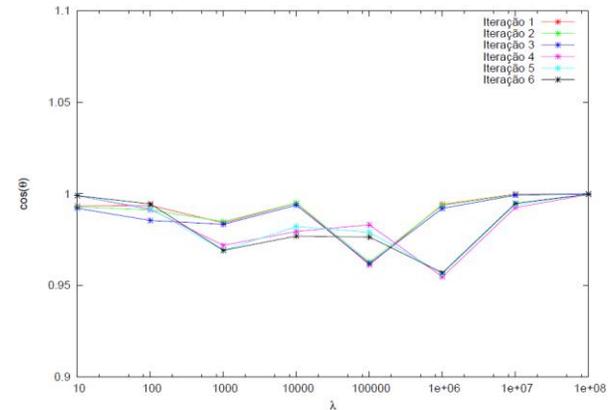


Figura 5: Curvas  $\Theta$  para diferentes iterações da inversão linearizada com regularização de primeira ordem.

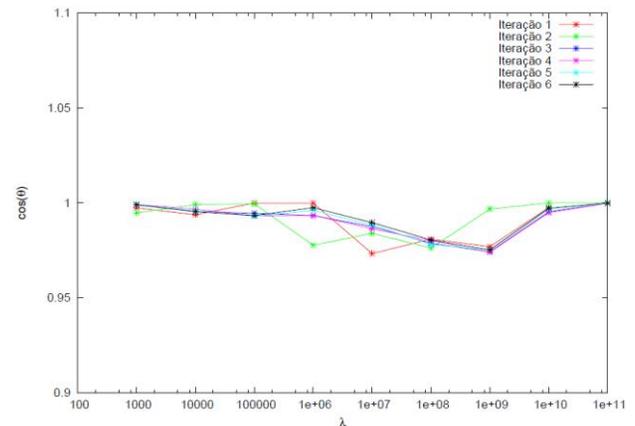


Figura 6: Curvas  $\Theta$  para diferentes iterações da inversão linearizada com regularização de segunda ordem.

Em ambos os casos, a convergência foi possível com 6 iterações. A Figura 7 mostra a primeira iteração para regularização de ordem 2 e a Figura 8 a sexta iteração. Há um progressivo aumento da resolução do tomograma com o número de iterações, pode-se perceber um maior refinamento das estruturas geológicas e diferenças mais sutis entre as camadas são reveladas.

O mesmo padrão de aumento de resolução é visto com a avanço das iterações na inversão com regularização de segunda ordem, conforme pode ser visto nas Figuras 9 e 10. Inclusive, comparando-se o produto final das duas inversões, fica evidente uma maior eficiência da inversão de ordem dois na apresentação de detalhes geológicos. Nesta ordem, as camadas de espessura menor estão explicitamente destacadas.

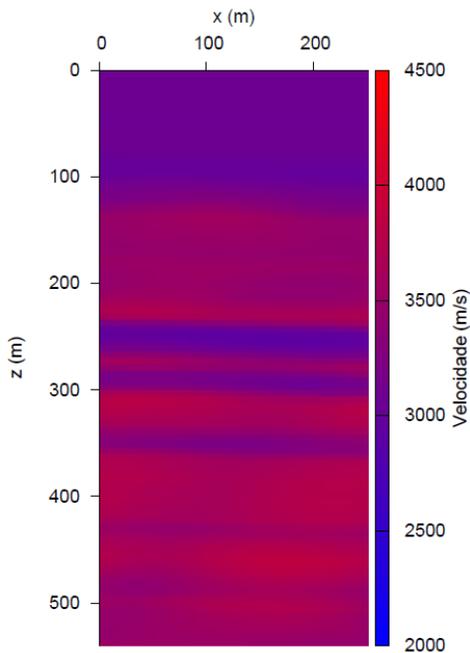


Figura 7: Distribuição de velocidades recuperadas na primeira iteração pela inversão linearizada com regularização de Tikhonov de ordem 1 utilizando o método Gradiente Conjugado.

### Conclusões

A tomografia sísmica de tempos de trânsito se apresenta com uma poderosa ferramenta de imageamento de alta resolução. No entanto, dois obstáculos se impõem na inversão: a não linearidade do problema e o fato do problema inverso apresentar infinitas soluções, ou seja, ser mal posto. A questão da não linearidade é tratada com o uso da inversão linearizada, que transforma o problema em linear dentro de certos limites. A regularização condiciona a solução dentro de alguns limites e torna mais plausível geologicamente os modelos recuperados.

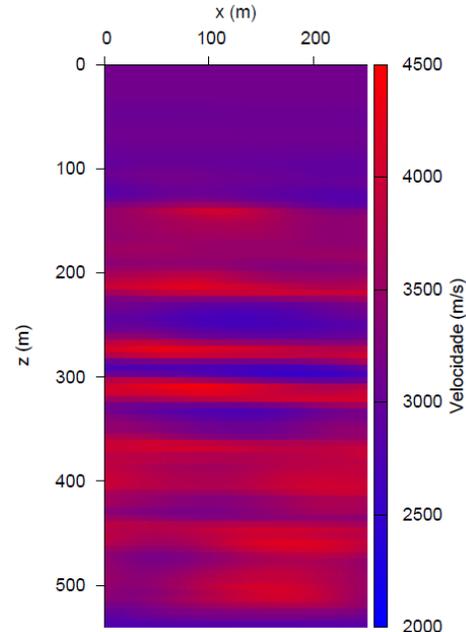


Figura 8: Distribuição de velocidades recuperadas na sexta iteração pela inversão linearizada com regularização de Tikhonov de ordem 1 utilizando o método Gradiente Conjugado.

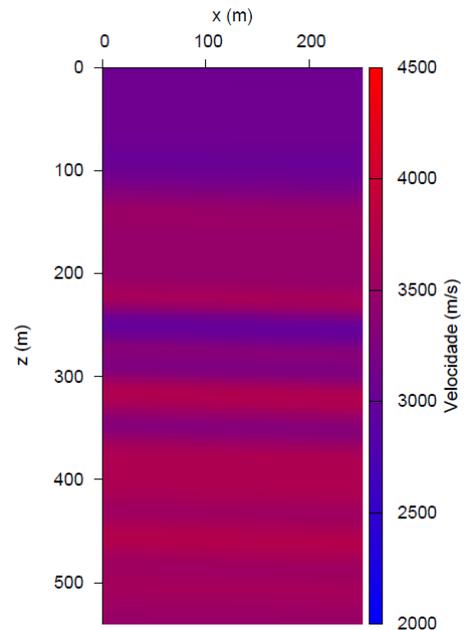


Figura 9: Distribuição de velocidades recuperadas na primeira iteração pela inversão linearizada com regularização de Tikhonov de ordem 2 utilizando o método Gradiente Conjugado.

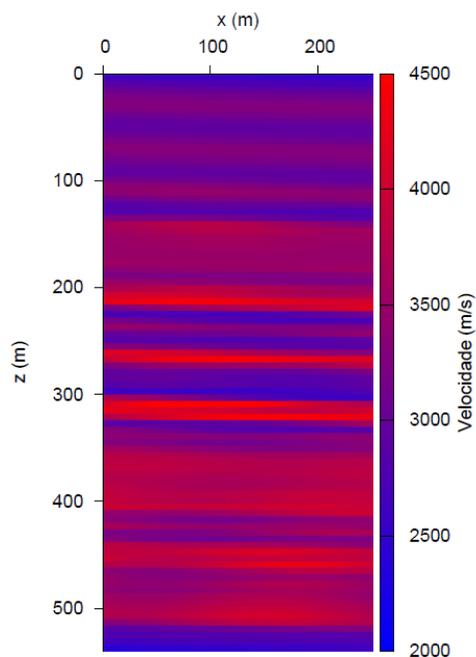


Figura 10: Distribuição de velocidades recuperadas na primeira iteração pela inversão linearizada com regularização de Tikhonov de ordem 2 utilizando o método Gradiente Conjugado.

Alguma diferença foi notada entre o comportamento teórica das curvas L e  $\Theta$  e o que se obteve nas simulações numéricas. Era esperado que o valor ótimo do parâmetro de regularização estivesse associado ao primeiro ponto de inflexão da curva L, no entanto, tais valores se mostraram inúteis e geraram tomogramas sem plausibilidade geológica. Os valores de  $\lambda$  utilizados estiveram mais próximos do segundo ponto de inflexão. Credita-se a essa divergência a uma presença mais forte de ruídos.

O resultado das duas ordens de regularização foram satisfatório e mostraram a capacidade de resolver camadas geológicas da tomografia. Destaque para inversão de segunda ordem, que apresentou resultados de melhor resolução.

Conforme mostrado, a aquisição deixou de cobrir uma parte considerável de área. Regiões pouco iluminadas aumentam a incerteza nos resultados da Inversão. Além disso, nenhuma informação *a priori*, seja ela geológica ou geofísica, foi utilizada. Outras fontes de informação restringem ainda mais o espaço de soluções e ajudam a contornar o problema da não unicidade. Perfis de poço dos dois poços onde foi feita a aquisição podem ser usados para refinar ainda mais os resultados e tornar mais confiável o processo de inversão.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS por patrocinar o projeto "Investigação sobre o Uso da Tomografia de Transmissão na Caracterização de Reservatórios Complexos" e pela permissão do uso dos dados reais neste trabalho. V. H. S. S. Rodrigues agradece a bolsa

de mestrado da ANP (PRH 08). A. Bassrei agradece ao CNPq pelo projeto 308.690/2013-3 (bolsa de produtividade de pesquisa), ao CNPq e PETROBRAS pelo apoio ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica de Petróleo (INCT-GP), e à FINEP pelo apoio à Rede Cooperativa de Pesquisa em Geofísica de Exploração (Rede 01).

### Referências

Andersen, A. H. e Kak, A. C. (1982) Digital ray tracing in two-dimensional refractive fields, *Journal of Acoustical Society of America*, 72(5):1593-1606.

Bassrei, A., Rodi, W. L. (1993) Regularization and inversion of linear geophysical data. 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, volume I, 111-116.

Hansen, P. C. (1992) Analysis of discrete ill-posed problems by means of L-curve, *SIAM Review*, 34:561-580.

Hestenes, M. R. and Stiefel, E. (1952) Methods of Conjugate Gradients for solving linear systems, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49(6):409-436.

Levenberg, K. (1944) A method for the solution of certain nonlinear problem in last square, *Quarterly of Applied Mathematics*, 2: 164-168.

Marquardt, D. (1963) An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters, *Journal of the society of Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431-441.

Lytle, R. J e Dines, K. A. (1980) Interactive ray tracing between boreholes for underground image reconstruction. *Inst. Elect. Electron. Eng Trans. Geosci. Remote Sensing. GE-1b*, 243-240.

Milani, E. J. r e Araújo, L. M. (2003) Recursos Minerais Energéticos: Petróleo. In L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, CPRM, Brasília, 2003.

Oliveira, N. P. (2013) Aplicação da tomografia sísmica de tempos de trânsito em dados do campo de Dom João, Bacia do Recôncavo. *Dissertação de Mestrado em Geofísica*, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Santos, E. T. F., Bassrei, A., & Costa, J. C. (2006) Evaluation of L-Curve and  $\Theta$ -curve approaches for the selection of regularization parameter in anisotropic travelttime tomography. *Journal of Seismic Exploration*, vol. 15, p. 245-272.

Sneider, R. e Trampert, J. (1999) Inverse problems in geophysics, In: *Wavefield Inversion*, pp. 119-190, Springer Verlag, New York.

Tikhonov, A. N. e Arsenin, V. Y. (1977) *Solution of ill-posed problems*, Wiley, Washington.