

## Construção de modelo de velocidade em profundidade utilizando velocidades de migração em tempo

Leandro da S. S. Valente, UFPA  
Jesse C. Costa, UFPA

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III 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.

### ABSTRACT

One of the major challenges to seismic imaging in complex geological regions is velocity model building in depth. If lateral variation in the propagation velocity is moderate, a depth velocity model can be built starting from time migration velocities. We review the theoretical relation between these velocities based on the paraxial ray theory. The estimation of depth velocities from time migration velocities is unstable. We implement regularized versions of the time to depth conversion based on Dijkstra-like fast marching methods. Two more efficient variations from the original algorithm proposed recently in the literature are evaluated. The relation between the polynomial degree and the regularization value for the least-squares problem associated with the wavefront interpolation are determined. Finally, We test these algorithms on 2D synthetic data and compare the results obtained by three ray tracing algorithms.

### INTRODUÇÃO

A migração em tempo é um processo robusto e rápido, por isso é o mais comum. Ela é adequada para áreas com pouca variação lateral de velocidade, mas falha no imageamento de refletores sob condições geológicas complexas, tais como domos de sal ou falhas de cavalgamento. Duas outras características da migração em tempo são a produção de imagens nas coordenadas  $(x_0, t_0)$  e a geração das velocidades de migração em tempo  $v_m(x_0, t_0)$ . Se as velocidades em subsuperfície dependem somente da profundidade, as velocidades de migração são aproximadamente as velocidades RMS (Dix, 1955). Mas em geral, as velocidades de migração estão relacionadas com o raio de curvatura da frente de onda emergente (Hubral e Krey, 1980).

A migração em profundidade é um processo mais demorado, entretanto com um resultado mais eficaz. Ela é adequada para áreas geologicamente bastante complexas com forte variação lateral de velocidade, ou seja, onde a migração em tempo não funciona. Entretanto, encontra-se dificuldade em sua implementação, uma vez

que esse processo requer a construção de um modelo de velocidade em profundidade  $v(\mathbf{x})$ . A construção de um modelo de velocidade acurado pode ser muito difícil e demorado, haja vista que a migração em profundidade é um processo iterativo complexo, no qual o modelo de velocidade é construído explicitamente enquanto os dados ainda estão sendo processados.

O objetivo deste trabalho é a construção de um modelo de velocidade  $v(\mathbf{x})$  a partir das velocidades de migração  $v_m(x_0, t_0)$  (Fig. 1). Com este modelo, pode-se realizar migração em profundidade para se obter rotineiramente uma imagem sísmica mais acurada com baixo custo computacional. Para isso, validamos e aplicamos os algoritmos de traçamento de raios e conversão tempo-profundidade desenvolvidos por Cameron et al (2007). Além disso, aplicamos as variações de implementação do algoritmo de traçamento de raios sugeridos por Valente (2007). Finalmente, apresentamos os testes feitos com os algoritmos em 2D, destacando a relação entre o grau do polinômio e o valor da regularização utilizados para resolver o problema dos mínimos quadrados envolvido no traçamento de raios.

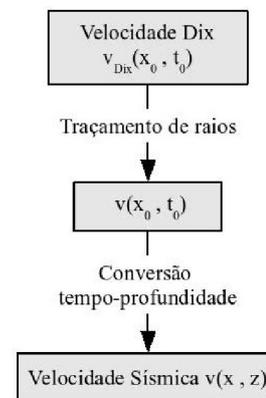


Figura 1: Processo de transformação das velocidades de migração em tempo para as velocidades em subsuperfície em 2D. Primeiro, calculam-se as velocidades Dix em tempo  $v_{Dix}(x_0, t_0)$ , em seguida, traçam-se os raios para gerar a entrada  $v(x_0, t_0)$  da conversão tempo-profundidade.

## GERAÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE EM PROFUNDIDADE

Suponhamos que haja um raio-imagem (Hubral, 1980) chegando em um ponto  $x_0$  na superfície, com  $x_{min} < x < x_{max}$ . Para cada  $0 < t_0 < t_{max}$ , tracemos os raios de volta no tempo  $t_0$ , juntamente com uma pequena família telescópica de raios (Červený, 2001). Considere que o raio-imagem alcance um ponto  $(x, z)$  em subsuperfície no tempo  $t_0$ . De acordo com Cameron et al (2007), a relação entre as velocidades de migração em tempo e em subsuperfície em 2D é dada por:

$$v_{Dix}(x_0, t_0) = \frac{v(\mathbf{x}(x_0, t_0))}{|Q(x_0, t_0)|} \quad (1)$$

sendo  $v_{Dix}(x_0, t_0)$  e  $|Q(x_0, t_0)|$  a velocidade Dix em tempo e o espalhamento geométrico na posição  $x_0$  e no tempo  $t_0$ , respectivamente, e  $v(\mathbf{x})$  a velocidade na posição  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ .

Sabe-se que a velocidade Dix é calculada supondo que as camadas em subsuperfície sejam horizontais e que a velocidade dependa somente da profundidade, tornando a estimativa do modelo de velocidade  $v(\mathbf{x})$  menos acurada. Desse modo, aplica-se o traçamento de raios para obter um modelo de velocidade em tempo  $v(x_0, t_0)$  mais exato. Este modelo é a entrada do algoritmo de conversão tempo-profundidade baseado no métodos de *Dijkstra-like fast marching* (Sethian, 1999a). O papel desse algoritmo é produzir o modelo de velocidade em profundidade através da resolução do sistema de equações:

$$|\nabla t_0|^2 = s^2(x_0, t_0) \equiv s^2(x_0(\mathbf{x}), t_0(\mathbf{x})) \quad (2)$$

$$|\nabla t_0| \cdot |\nabla x_0| = 0,$$

para  $s(x_0, t_0)$  desconhecido, diferentemente do algoritmo original de Sethian, que soluciona o problema para  $s(x_0, t_0)$  conhecido. As condições iniciais do sistema (2) são:

$$x_0(x_1, 0) = x_1, \quad t_0(x_1, 0) = 0 \quad (3)$$

$$s(x_1, 0) = s(x_0 = x_1, t_0 = 0)$$

Com a finalidade de seguir a propagação física da informação, a solução é calculada no sentido crescente de  $t_0$ . Para isso, os pontos contendo as informações são divididos em: *aceitos*, para os quais  $t_0$  é calculado somente uma única vez, podendo ser utilizado na estimativa de  $t_0$  de pontos vizinhos; *considerados*, para os quais  $t_0$  é calculado, mas que posteriormente pode ser atualizado, além de também poder ser utilizado no cálculo de  $t_0$  em outros pontos; e *desconhecidos*, para os quais nenhum valor de  $t_0$  foi ainda estimado. Para cada passo no tempo, o ponto considerado com menor valor de  $t_0$ , o qual é determinado com organização de dados em pilha (*heap sort*), torna-se aceito (Fig. 2).

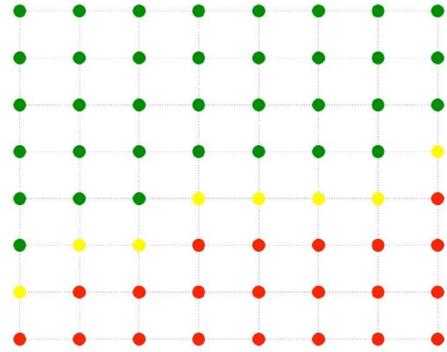


Figura 2: Método de marcha rápida. Os pontos verdes, amarelos e vermelhos são pontos *aceitos*, *considerados* e *desconhecidos*, respectivamente.

## EXPERIMENTOS NUMÉRICOS EM 2D

Aplicamos os algoritmos de traçamento de raios e conversão tempo-profundidade ao dado sintético Marmousoft (Versteeg and Grau, 1991). As velocidades de migração podem ser visualizadas na figura 3, obtidas através de tomografia sísmica baseada no método quasi-newton (Soares, 2007).

Os modelos de velocidade em profundidade obtidos utilizando traçamento de raios original, polinômio cúbico e valores de regularização 0,003, 0,03 e 0,3, podem ser observados na figura 4. Observam-se que os modelos obtidos são bem razoáveis. Além disso, verifica-se que conforme há um aumento no valor da regularização a conversão se torna mais estável, isso pode ser visto com maior facilidade no canto inferior direito das imagens.

A figura 5 mostra modelos de velocidade em profundidade obtidos com polinômio de grau 7, valor de regularização 0,5 e os três tipos de traçamento de raios (Valente, 2007). Observa-se novamente a eficácia da conversão tempo-profundidade. Note-se que os modelos obtidos são bastante semelhantes, indicando a equivalência entre os três algoritmos de traçamento de raios utilizados.

## CONCLUSÕES

Discutimos a importância da construção de um modelo de velocidade em profundidade quando se deseja imagear regiões de alta complexidade geológica. Nessas regiões a migração em tempo falha. Desse modo, deve-se preferencialmente migrar em profundidade para se obter uma imagem mais acurada.

Neste trabalho, construímos modelos de velocidade em profundidade em 2D com base na relação entre as velocidades em subsuperfície e de migração em tempo. Para isso, aplicamos os algoritmos de traçamentos de raios e conversão tempo-profundidade no modelo Marmousoft.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que

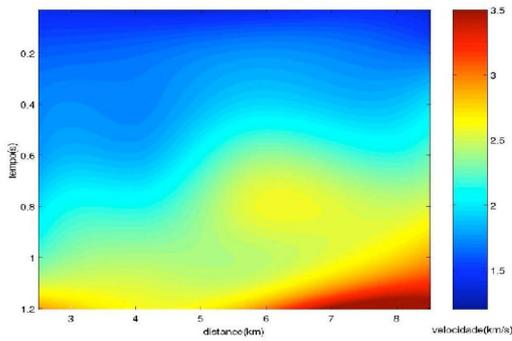


Figura 3: Velocidades de migração para o modelo Marmousi.

conseguimos modelos de velocidade coerentes com as características do modelo de velocidade de migração. Adicionalmente, observamos que para obtermos modelos mais acurados devemos utilizar valores de regularização mais altos. Quanto mais alto for o grau do polinômio maior será o valor da regularização. Finalmente, verificamos a equivalência entre os algoritmos de traçamento de raios descritos em Valente (2007).

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro dado pela ANP.

#### REFERÊNCIAS

- Cameron, M. K., Fomel, S. B., and Sethian, J. A., 2007, Seismic velocity estimation from time migration: *Inverse Problems*, **23**, 1329–1369.
- Červený, V., 2001, *Seismic ray theory*: Cambridge University Press, Cambridge.
- Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements: *Geophysics*, **20**, 1662–1672.
- Hubral, P., and Krey, T., 1980, Interval velocities from seismic reflection time measurements: *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, OK.
- Hubral, P., 1977, Some ray theoretical aspects.: *Geophysics Prospecting*, **25**, 738–745.
- Popov, M. M., 2002, *Ray theory and gaussian beam method for geophysicists*: EDUFBA, Salvador.
- Robein, E., 2003, *Velocities, time-imaging and depth-imaging in reflection seismics – principles and methods*: EAGE Publications, The Netherlands.
- Sethian, J. A., 1999a, Fast marching methods: *SIAM Review*, **41**, no. 2, 199–235.

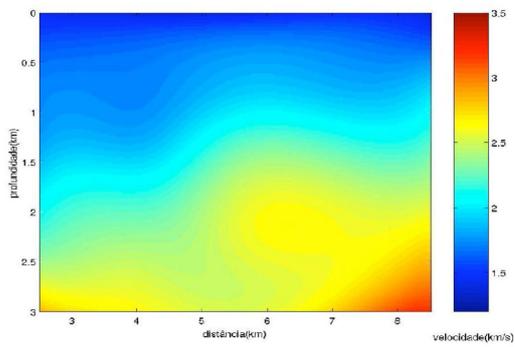
Soares, P. T., 2007, *Tomografia aplicada à migração em tempo*: UFPA, Belém-Pa.

Tarantola, A., 2005, *Inverse problem theory and methods for parameter estimation*: SIAM.

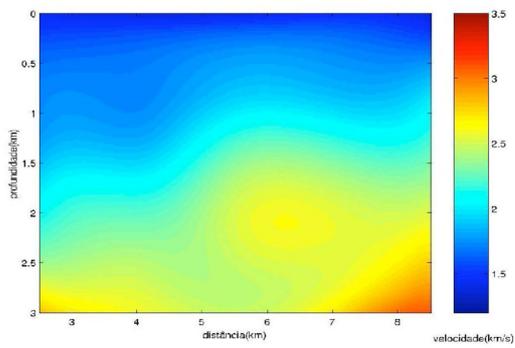
Valente, L. S. S., 2007, *Estimativa de modelo de velocidade em profundidade a partir de velocidades de migração em tempo*: UFPA, Belém-Pa.

Versteeg, R. J., and Grau, G., 1991, *The marmousi experience*: EAGE.

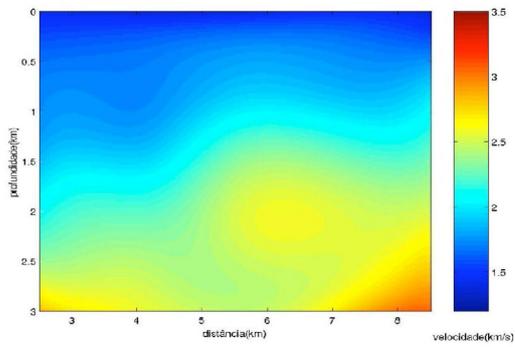
Yilmaz, O., 2001, *Seismic data analysis*: Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.



(a)

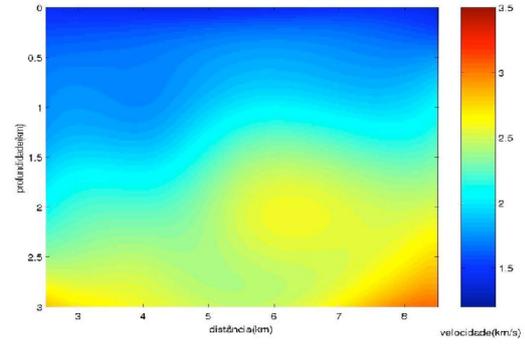


(b)

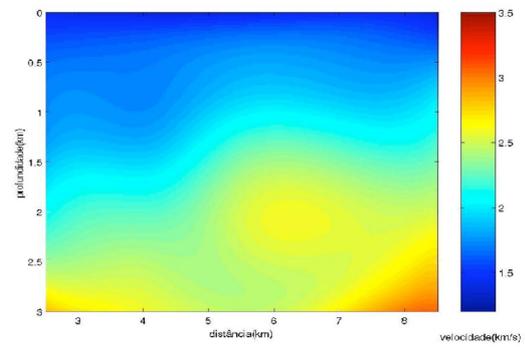


(c)

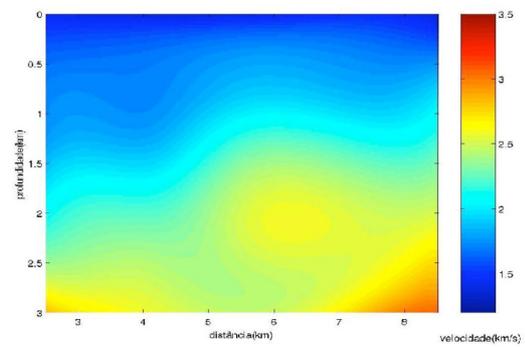
Figura 4: Modelos de velocidade em profundidade obtidos com polinômio cúbico, traçamento de raios original e regularizações de 0,003 (a), 0,03 (b) e 0,3 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5: Modelos de velocidade em profundidade obtidos com polinômio de grau 7, regularização igual a 0,5 e traçamento de raios original (a), alternativa 1 (b) e alternativa 2 (c) (Valente, 2007).