



Inversão não-linear por busca aleatória controlada

Penha L. N. M. – UFPA lidiane@ufpa.br; Leite L. W. B. – UFPA lwbleite@ufpa.br; Gomes E. N. S. – UFPA ellensq@ufpa.br

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.

Resumo

O objeto de estudo deste trabalho é o problema de inversão não-linear de dados sísmicos de reflexão voltados à exploração de petróleo em bacias sedimentares. O modelo direto é descrito por camadas homogêneas, isotrópicas com interfaces plano-horizontais. O problema de inversão é classificado como ajuste não-linear de curvas, mal-posto, mixto-determinado.

A solução do problema de inversão é por otimização através da combinação de um método de reparametrização à forma linear (RL) com um método de otimização global por busca aleatória controlada (BAC). A função objeto de minimização de base de referência dos métodos de otimização é a norma 2. A justificativa é que estes dois métodos são relativamente opostos nas suas concepções e descrições.

A aplicação é voltada à simulação sísmica de bacias sedimentares para se obter uma distribuição local 1D de velocidades integradas (média-quadrática) para a área-alvo. Apresentamos dois modelos distintos: um modelo sintético com 180 camadas intervalares de uma bacia rasa; e dados reais de bacia marinha profunda.

Introdução

Os modelos sísmicos para simulação, imageamento e mapeamento são baseados na descrição geológica de trechos de bacias sedimentares terrestres e marinhas, com a finalidade de estudar condições de risco exploratório de petróleo (gás e óleo). Neste trabalho estamos descrevendo dois modelos geológicos. O primeiro modelo foi gerado a partir de dados reais de poço, de onde foram gerados dados sísmicos simulados com 180 camadas intervalares. O segundo modelo foi de dados reais de bacia marinha. A descrição destes dois modelos justifica a presença de camadas com interfaces sub-horizontais a plano-horizontais que servem de guia para o delineamento de estruturas com formas geométricas complexas do tipo anticlinais e sinclinais e de descontinuidades.

A descrição do método sísmico passa literalmente pelo conjunto completo: fonte (explosão e seu acoplamento),

meio (geologia sedimentar complexa) e receptor (linha de sensores, eletrônica e ruídos instrumentais).

O estudo central deste trabalho é estudar o problema de inversão não-linear de dados sísmicos de reflexão para o arranjo fonte-com um (FC), considerando o caso do modelo de camadas homogêneas e isotrópicas, com interfaces plano-horizontais como refletoras, o que faz equivaler ao arranjo ponto-médio-comum (PMC) (Figura 1), e diretamente relacionado à correção e empilhamento NMO.

A inversão desenvolvida é classificada como otimização não-linear por ajuste de curvas, através da combinação dos métodos RL e BAC. A aplicação foi realizada num modelo sintético de 180 camadas intervalares e num conjunto de dados reais.

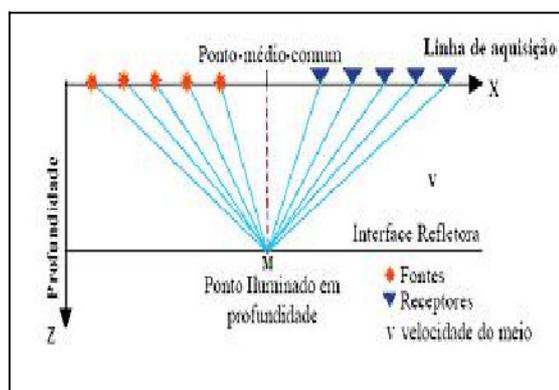


Figura 1. Desenho da simetria e relação das configurações ponto-médio-comum (PMC) com o ponto-comum-em-profundidade (PCP), mostrando a iluminação pontual em subsuperfície. Os receptores à direita correspondem às fontes à esquerda, vice-versa.

Descrição do Modelo Direto

Numa forma prática, o modelo direto requer que a equação temporal seja escrita em função do afastamento na forma geral $T = T(x, v, z)$, onde participam os parâmetros das camadas envolvidas (velocidade, v , e espessura, z). O modelo adotado corresponde ao utilizado na correção ao afastamento-nulo segundo a trajetória hiperbólica que relaciona diretamente o afastamento fonte-receptor (Sherif & Geldart, 1985) dado por (ver Figura 2):

$$T^2(x) = T_0^2 + x^2/v_{rms}^2; \quad (1)$$

$$v_{rms}^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i / \sum_{i=1}^n \Delta t_i; \quad \Delta t_i = z_i/v_i \quad (2)$$

em que v_{rms} é a velocidade integrada (média-quadrática) para o modelo de camadas plano-horizontais.

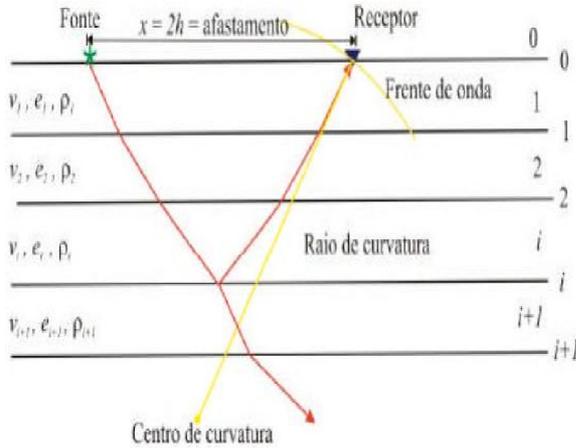


Figura 2. Modelo de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas) entre dois semi-espacos (meio 1D).

Descrição do Modelo Inverso

No problema direto, $T = T(x;v,z)$ serve para representar um conjunto [seção sísmica] no espaço dos dados $D = T(x)$, desejando-se estimar um modelo m no espaço dos parâmetros $M = m(v,z)$. (Menke, 2002; Crase et al., 1990; Tarantola, 1994).

A função objeto de minimização é a norma 2, que estabelece o vínculo sobre as informações, e tem a característica de ser positiva e multimodal em função do ruído presente nos dados observados. A função objeto de minimização é dada por:

$$\phi(m) = \sqrt{1/N \sum_{j=1}^N [T_j^{obs} - T_j^{pre}(v,z)]^2}. \quad (3)$$

Onde $T^{obs}(x)$ é o dado observado, e $T^{pre}(x;v,z)$ é o preditivo.

Na solução do problema inverso através do método BAC, se deseja a solução do problema (P) de otimização global, não-vinculado, estruturado da seguinte forma: $\min f(m)$, $m \in R^M$, onde $\phi: R^n \rightarrow R$ é uma função contínua; isto é, se busca o mínimo da função contínua $f(m)$, onde o vetor de parâmetros m (dimensão M) a

determinar é definido no espaço R^M . Desta forma, m representa pontos [coordenadas $m_i, (i = 1, M)$] no espaço contínuo dos parâmetros M , de forma que os dados teóricos, $T^{pre} = (x;v,z)$, ajuste aos dados observados, $T^{obs} = (x)$, no sentido da norma 2, onde $M = m(v,z)$.

Na solução do problema inverso usando o método RL, se deseja a solução do problema de otimização através da reparametrização do modelo hiperbólico, $T = T(x;v,z)$, a uma forma linear dada por:

$$\tau(\xi) = \tau_0 + k\xi, \quad (4)$$

onde $\tau = T^2(x)$, $\xi = x^2$, $k = 1/v_{rms}^2$. Neste método, devido ao efeito da quadratura, os erros em $T^{obs}(x)$ são amplificados. A inversão RL leva a uma forma sobre-determinada, cuja solução é dada por:

$$\hat{m} = (G^T G)^{-1} G^T d. \quad (5)$$

A matriz covariância dos parâmetros, sob a consideração de que os dados têm uma distribuição Gaussiana, são não-correlacionados e de variância σ_d^2 , é dada por:

$$Cov(m) = M [Cov(d)] M^T. \quad (6)$$

Além da matriz $Cov(m)$, as matrizes resolução dos parâmetros e resolução dos dados foram calculadas, e serviram como partes de análise do problema de inversão.

Resultados

Dados Sintéticos

O modelo sintético usado para gerar as seções sísmicas consistiu de 180 camadas (ver Figura 3), onde a distribuição intervalar em profundidade é formada por uma função multi-degrau, cuja forma é resultante da interpretação de dados sísmicos de poço. Além disso, a figura sugere uma interpretação inicial por camadas plano-horizontais, o que corresponde à discretização da geologia da subsuperfície.

As seções sintéticas FC (fonte-comum), bilaterais simétricas, para este modelo (ver Figura 3) foram reorganizadas em seções PMC (ponto-médio-comum) usando o sistema CWP/SU. A seção escolhida para a inversão foi a PMC-100, com cobertura de 50 traços, que passou a representar o dado observado.

Na seção PMC-100, os pontos são marcados seguindo uma trajetória hiperbólica lateralmente. Como exemplo, foram feitas apenas 25 marcações (pickings) para cada trajetória de reflexão para evitar o problema de superposição (ver Figura 4).

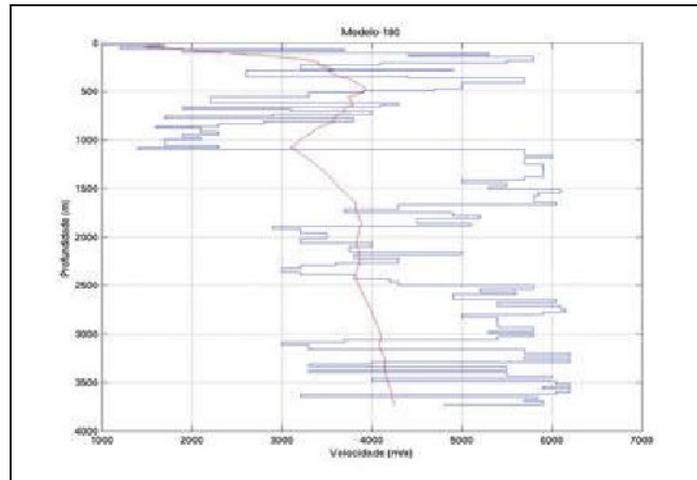


Figura 3. Distribuição da velocidade intervalar em profundidade representado por uma função multi-degrau (cor azul). A curva vermelha contínua é da função velocidade RMS.

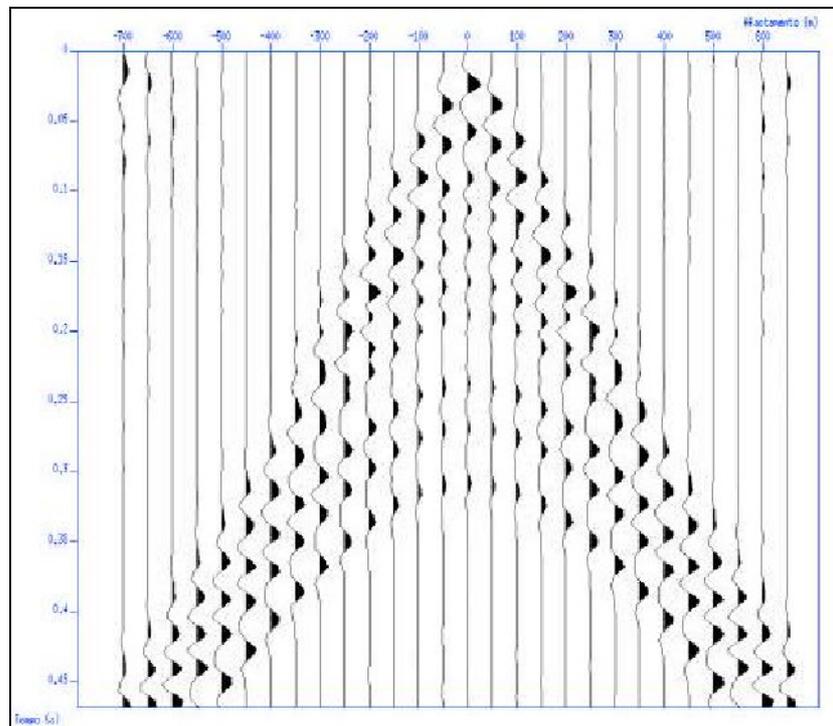


Figura 4. Seção sintética PMC-100 mostrando os eventos primários de reflexão das ondas P. Esta seção possui cobertura de 50 traços.

Na seção PMC-100, os pontos foram marcados seguindo uma trajetória hiperbólica lateralmente. Como exemplo, foram feitas apenas 25 marcações (*pickings*) para cada trajetória de reflexão para evitar o problema de superposição (ver Figura 4).

Tratando do modelo-180, os experimentos para verificar o comportamento do método de inversão não-linear (BAC) na presença de ruído aditivo aos dados permitiram obter soluções plausíveis para níveis de ruído abaixo de 5%, e um exemplo dos resultados das estimativas da v_{rms} estão na Figura 5.

Observa-se pelas Figuras 5 e 6 que as velocidades RMS estimadas têm um comportamento linear e sistematicamente aproximadas à exata da Figura 3, o que implica num mesmo comportamento para as espessuras estimadas. Este resultado é importante no diagnóstico do processo de inversão, e mostra que a inversão não-linear se comporta estavelmente.

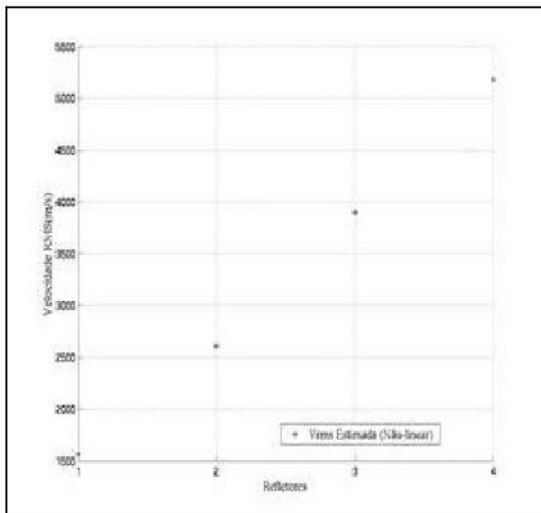


Figura 5. Modelo-180 com 5% de ruído aditivo. Forma selecionados apenas 4 eventos, onde está mostrado as velocidades RMS (v_{rms}): estimada pela inversão não-linear a partir da marcação do tempo de trânsito.

Observa-se na Figura 6 que o ajuste pelo método BAC foi bom. Além disso, os experimentos com um ruído acima de 5% foram prejudiciais a este método.

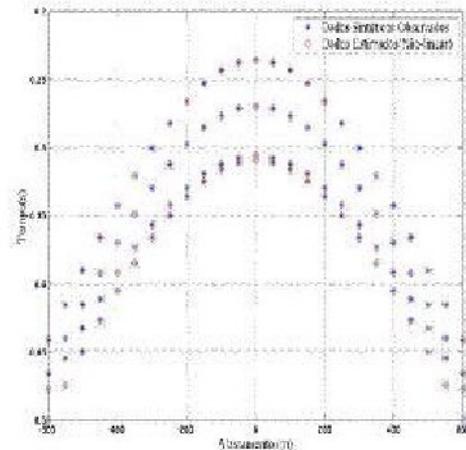


Figura 6. Marcações tempo-distância: (cor azul) dados sintéticos observados; (cor vermelha) dados ajustados.

Dados Reais

Para os dados reais da Bacia Marinha, a linha sísmica selecionada para a inversão não-linear foi a PMC-1000. Esta linha é composta de 1098 pontos de tiro, com arranjo unilateral-direito. O intervalo de amostragem é de 4ms. O espaçamento entre os geofones é de 13,34m, com o primeiro geofone localizado a 300m da fonte. O espaçamento entre fontes é de 26,68m.

As seções tiro-comum apresentam pouco ruído de levantamento. O pré-processamento foi realizado usando o sistema CWP/SU, e iniciou com a organização da geometria com números inteiros. A segunda etapa constou do silenciamento de traços danificados e ruidosos. A terceira parte constou de testes com filtros banda-passante trapezoidais, sendo o escolhido com cantos 5, 15, 75 e 85 Hz.

Os eventos marcados foram considerados como reflexões primárias, e por si só constituem uma interpretação da seção. Na prática de marcação procura-se seguir a trajetória de um evento na seção sísmica com característica hiperbólica. Como exemplo, usualmente em trabalhos práticos da exploração de petróleo são delineados ao redor de 4 refletores-guia, mas em trabalhos de inversão um número maior de refletores deve ser marcado para melhor representar a geologia.

Como exemplo, foram marcados 30 pontos para cada trajetória de reflexão na seção PMC-1000 (Figura 7), que foi usado para a inversão não-linear dos dados reais, e os resultados das estimativas da v_{rms} estão mostrados na Figura 8. Deve ser entendido que há um ruído presente nos dados devido ao processo de marcação, que no presente caso foi manual usando o programa Suxpicker do SU.

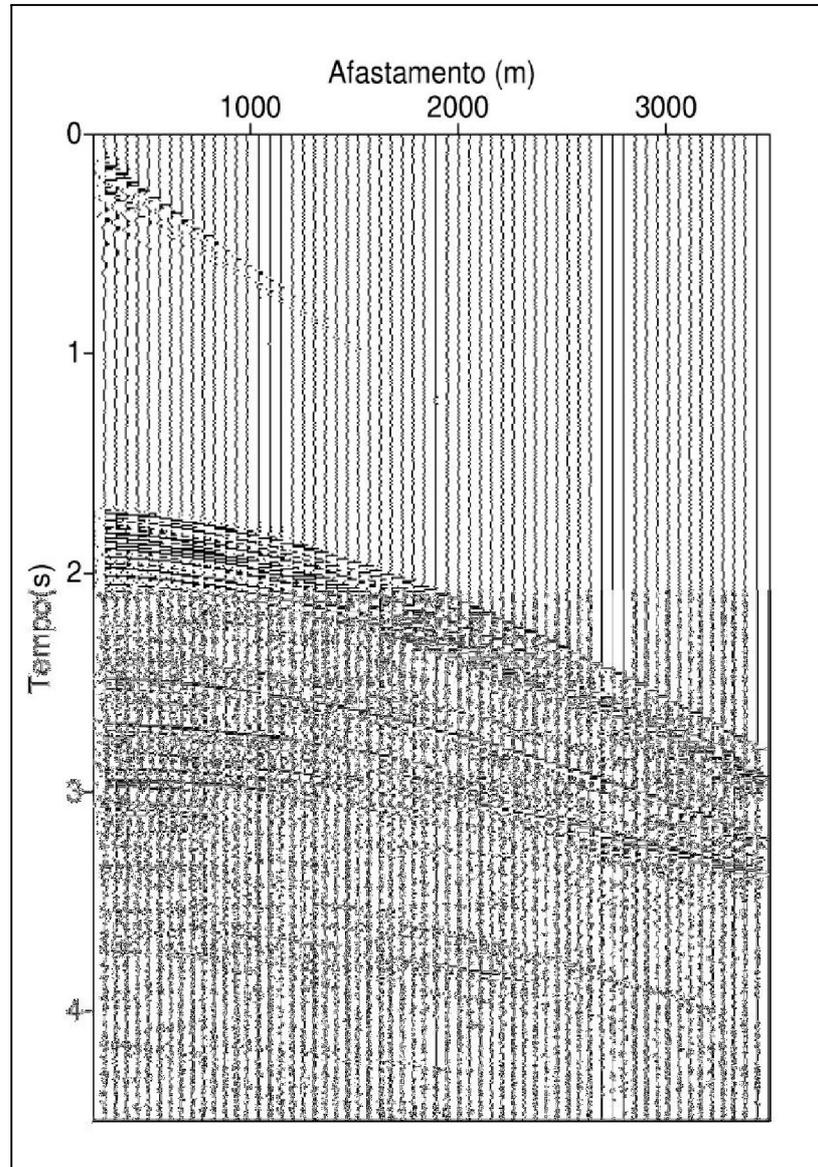


Figura 7. Seção PMC-1000 (tempo-distância) após aplicação do filtro trapezoidal (banda-passante: 5, 15, 75, 85 Hz). Esta seção foi usada para fazer a marcação de pontos para a inversão não-linear.

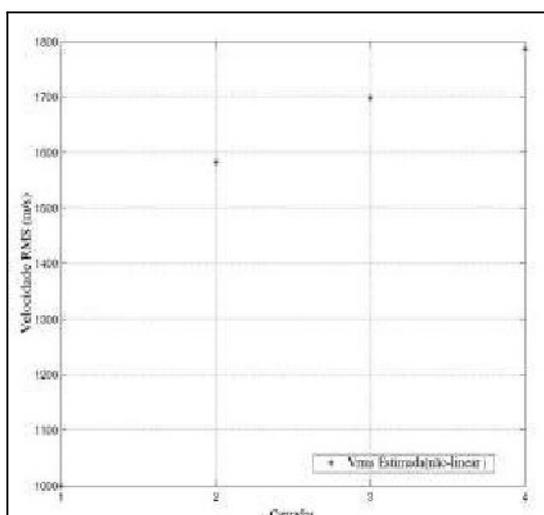


Figura 8. Dado real Marinho. Velocidades RMS (v_{rms}) estimada pela inversão não-linear a partir da marcação do tempo de trânsito.

Conclusões

As soluções das inversões para o modelo de 180 camadas só foram plausíveis com o método de busca aleatória. Sendo assim, os resultados com o método de reparametrização não estão aqui apresentados.

O experimento com o modelo-180, com um máximo de 5% de ruído aditivo nos tempos de trânsito, apresentado pelas Figuras 5 e 6, demonstram que as velocidades RMS estimadas têm um comportamento linear e sistematicamente aproximados à exata da Figura 3, o que implica num mesmo comportamento para as espessuras estimadas.

Este resultado é importante no diagnóstico do processo de inversão, e mostra que a inversão não-linear BAC se comporta estavelmente. Além disso, um modelo em profundidade com centenas de camadas permitirá a análise de diferentes intervalos em profundidade, e pode realçar dificuldades que se apresentam na interpretação de intervalos em tempo.

Na inversão de dados reais, o ruído presente corresponde à dificuldade das marcações dos eventos selecionados, uma vez que não como estimar ruídos aditivos em dados reais. O resultado da estimativa da v_{rms} a partir do BAC foi estável, conforme mostra a Figura 8.

Como uma última observação, foi estabelecida no presente trabalho uma estrutura inicial para atacar o problema inversão de dados sísmicos baseado em refletores plano-horizontais e ondas primárias,

salientando o uso potencial da inversão não-linear baseada na combinação de métodos de inversão para reforçar na condição de informação a priori. No presente caso foram escolhidos dois métodos: um de busca aleatória controlada, e outro de reparametrização. A estratégia maior é desenvolver métodos voltados à inversão da curva tempo-distância nas configurações ponto-médio-comum, fonte-comum e sensor-comum.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Petrobras, FINEP para a pesquisa, e a bolsa escolar CAPES de L. N. M. Penha.

Referências

- CRASE, E.; PICA, A.; NOBLE, M.; MCDONALD, J.; TARANTOLA, A. 1990. Robust elastic nonlinear waveform inversion: application to real data. *Geophysics*, v. 55, n. 5, p. 527-538
- MENKE W. 2002, *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. [S.l.]: Academic Press.
- SHERIFF, R. E.; GELDART, L. 1985. *Exploration Seismology: History, Theory and Data Acquisition*. Cambridge: University Press, v.6.
- TARANTOLA A. , 1994. *Inverse Problem Theory*. Holland: Elsevier.