



Imageamento sísmico em meios complexos usando iluminação controlada

Bruno Mendes da Silva¹, Josias J. Silva² e Djalma M. S. Filho³

¹Laboratório Multidisciplinar de Modelagem de Bacias - LAB2M/COPPE/UFRJ

²CENPES /PETROBRAS

Copyright 2006, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no II Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, Natal, 21-23 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do II SR-SBGf 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 presente trabalho aborda a utilização da técnica de *Registro de Múltiplas Fontes* no imageamento de estruturas geologicamente complexas. Esta é uma técnica de empilhamento de famílias de tiro comum, cujo dado empilhado é equivalente àquele que seria obtido na aquisição de uma detonação de múltiplas fontes, simultaneamente ou com atrasos entre os tiros, gerando um único dado, o chamado *supersismograma*. Foi utilizado para testes, numa modelagem numérica acústica, o modelo sintético de velocidade MARMOUSI. As seções migradas foram obtidas através dos métodos RTM e PSPI. No intuito de focalizar as áreas de interesse exploratório, utilizou-se também o método de *Migração Orientada ao Alvo* numa abordagem um pouco diferente da proposta pioneiramente. No presente trabalho um tiro simulado é dado acima do alvo e registrado na superfície, de onde se retiram os atrasos da chegada da onda direta. Estes são utilizados na detonação das múltiplas fontes, formando acima deste alvo uma frente de onda plana. Resultados promissores foram encontrados, principalmente em relação ao imageamento em regiões abaixo de camadas que apresentam altos contrastes de impedância, demonstrando que a técnica apresenta-se uma alternativa viável à migração pré-empilhamento convencional.

Introdução

Nos últimos anos vem se acentuando na Indústria do Petróleo o número de empresas de serviços na área de processamento sísmico que oferecem aos seus clientes a opção de migração pré-empilhamento, impulsionada principalmente pela capacidade de processamento de *clusters* de computadores cada vez mais potentes. Algumas das técnicas mais utilizadas são a Migração por Rotações

de Fase mais Interpolação (*Phase Shift Plus Interpolation – PSPI*) (Referência) e a Migração Reversa no Tempo (*Reverse Time Migration – RTM*). Entretanto, dado seu custo computacional essas técnicas ainda tornam-se praticamente proibitivas na migração de volumes de dados muito grandes, como são os dados 3D marítimos, por exemplo. O *Registro de Múltiplas Fontes* (Berkhout, 1992; Cunha, 2002 e Zhang et al, 2003) tem se mostrado uma alternativa promissora na tentativa de contornar o problema do alto custo computacional dos métodos pré-processamento, sem perder a característica alta qualidade de imagem nas seções migradas obtidas por tais métodos. Ela é uma técnica de empilhamento de famílias de tiro comum cujo dado final equivale ao obtido se múltiplas fontes fossem detonadas, simultaneamente ou com atrasos, e registradas, obtendo-se assim um dado que chamamos de *supersismograma*.

A técnica de *Migração Orientada ao Alvo* é uma espécie de otimização da técnica de Registro de Múltiplas Fontes (Boechat et al, 2005). Ela nos possibilita imagear prioritariamente as áreas de interesse exploratório. Foram feitos inúmeros testes de obtenção de seções ótimas com número mínimo de registros de múltiplas fontes obtendo resultados muito bons em tempos de processamento muito baixos. O modelo sintético de velocidade utilizado foi o MARMOUSI (Figura 1), que foi desenvolvido pelo Instituto Francês de Petróleo e é baseado na geologia *offshore* da bacia de Cuanza, em Angola.

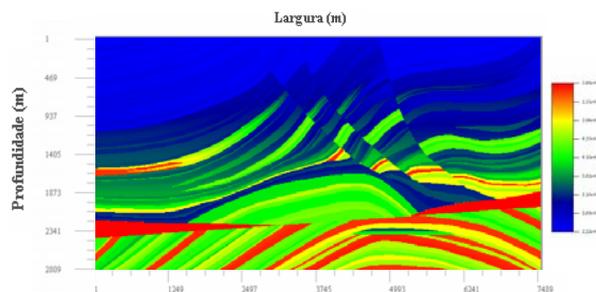


Figura 1 – Campo de velocidade do modelo sintético Marmousi. A seta indica a posição do principal reservatório do modelo.

Ele possui 1000 pontos de largura por 375 de profundidade, que sobre nossos parâmetros de modelagem representa uma área de 12000 m de largura por 4500 m de profundidade. Este modelo é marcado por duas fases geológicas. Na primeira, sedimentos carbonáticos formam uma estrutura anticlinal que “trapeia” um reservatório de hidrocarbonetos. Na segunda, há a presença de evaporitos na forma de domos e camadas finas de sedimentos como calcários argilosos, folhelhos e arenitos fortemente afetados por falhas normais, consistindo em um modelo estrutural extremamente complexo (Moreira, 2004).

Em todas as modelagens foram utilizados algoritmos baseados no método de discretização das diferenças finitas, com aproximação de segunda ordem no tempo e quarta ordem no espaço.

Registro de múltiplas fontes

Há de fato equivalência matemática entre a migração de um registro de n detonações, simultâneas ou com atrasos, e a migração de um dado empilhado de n registros de n detonações? Para responder a essa pergunta consideremos um operador linear $L(y)$ definido por:

$$L(y) = y^{(n)} + a_{n-1}(x)y^{(n-1)} + \dots + a_2(x)y'' + a_1(x)y' + a_0(x)y \quad (1)$$

onde $a_i(x)(i=0,1,2,\dots,n-1)$, são contínuos em algum intervalo (Boyce, 1990). Sendo L um operador linear, é valido o teorema:

$$L(c_1y_1 + c_2y_2 + \dots + c_iy_i) = c_1L(y_1) + c_2L(y_2) + \dots + c_iL(y_i) \quad (2)$$

Como a equação da onda é um operador linear:

$$\nabla^2 - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = L, \quad (3)$$

pode-se afirmar que na migração sísmica, baseada na equação da onda, há a equivalência:

$$L \sum_{i=1}^N sis(x, z = z_{OBS}, t; x_i) = \sum_{i=1}^N L(sis(x, z = z_{OBS}, t; x_i)), \quad (4)$$

onde $sis(x, z = z_{OBS}, t; x_i)$ é o sismograma registrado após uma detonação na posição $(x_i, z = z_{OBS})$, z_{OBS} é a profundidade na qual o registro foi realizado e N indica o número total de detonações.

Estabelecida essa equivalência entre a aplicação da equação da onda sobre o dado empilhado e o empilhamento dos dados sobre os quais ocorreu essa aplicação, vejamos como se dá o processo de construção do supersismograma. Inicia-se com a utilização da equação da onda, sendo o fator de

heterogeneidade a função fonte referente as n detonações (simultâneas ou com atrasos):

$$\nabla^2 u(x, z, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \sum_i^N fonte(t; x_i), \quad (5)$$

onde $fonte(t; x_i)$ é a função usada como fonte sísmica, detonada em N posições de tiro na superfície, dadas por x_i .

O campo de onda registrado no decorrer do tempo, registro de múltiplas fontes, é representado, por:

$$SIS(x, z = z_{OBS}, t; \hat{t}_i) = \sum_i^N u(x_i, z = z_{OBS}, t) \quad (7)$$

onde $SIS(x, z = z_{OBS}, t; \hat{t}_i)$ é o supersismograma, $u(x_i, z = z_{OBS}, t - \hat{t}_i)$ é o campo registrado por cada receptor e \hat{t}_i é o atraso entre os tiros.

Se o atraso for nulo (Figura 2.a), o registro de múltiplas fontes irá simular um tiro de n fontes, formando uma onda plana horizontal. Se for constante (Figura 2.c e 2.d), irá formar ondas planas inclinadas a esquerda e a direita, dependendo da posição do primeiro tiro. Entretanto os atrasos não necessariamente precisam ser lineares, podendo ser calculados por uma função por exemplo, como a senoidal (Figura 2.b).

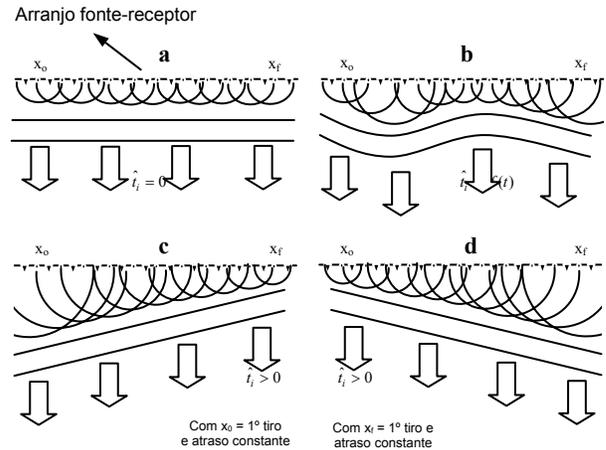


Figura 2 – Diferentes tipos de detonação dependentes do atraso dado por \hat{t}_i . a) Atraso nulo; b) atrasos calculados por uma função c) atraso constante com primeiro tiro na posição x_0 e d) atraso constante com primeiro tiro na posição x_f .

É justamente baseada nessa idéia de atrasos não lineares que a *Migração Orientada ao Alvo* surge como uma considerável otimização do método. A idéia central é que se o imageamento com ondas planas é eficaz então porque não iluminarmos com uma onda plana apenas a zona onde se encontra nosso objetivo? Como o método deixa aberta essa possibilidade, é necessário detonar as múltiplas fontes com um atraso tal que faça com que em profundidade, e exatamente

acima do objetivo, a onda plana seja formada. Mas descobrir quais os atrasos devem ser dados para obter-se isso?

Primeiramente vale esclarecer que no formalismo encontrado no trabalho de Boechat, o registro de múltiplas fontes é obtido com a soma das convoluções de cada família de tiro comum (deconvolvida da assinatura da fonte) com o chamado *operador de síntese*. Este é na verdade uma espécie de sismograma ou registro em superfície de uma detonação no interior do modelo, não trazendo, portanto, informações de reflexões, mas sim do campo de pressão da onda direta. Esse dado é migrado gerando a seção referente àquela determinada família de múltiplas fontes, com sua respectiva inclinação.

Nesse trabalho considera-se registro de múltiplas fontes apenas o simples empilhamento das famílias de tiro comum. Quando simulamos tiros de onda plana inclinada (ou com atrasos), estas famílias devem ser empilhadas com atrasos dados justamente pelos tempos de chegada da frente de onda que chega na superfície. Um dado típico desse tipo de atraso é mostrado na Figura 3. Ele mostra em segundos os tempos de trânsito da onda direta à profundidade de aquisição (z_{OBS}). A diferença entre o tempo de chegada máximo e os demais é justamente o atraso que precisamos embutir, via modelagem, na detonação das múltiplas fontes para sintetizar uma onda plana acima de nosso alvo em sub-superfície. Em se tratando de famílias de tiro comum, a idéia é realizar o empilhamento com base nesses atrasos, numa espécie de “correção de NMO ao contrário”. Cada família ficaria defasada temporalmente no dado final de acordo com seu respectivo atraso.

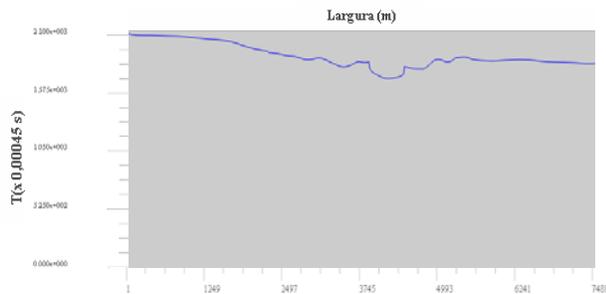


Figura 3 – Tempos de trânsito da onda direta no modelo Marmousi à profundidade de aquisição z_{OBS} , proveniente de uma detonação acima do alvo (alvo: anticlinal inferior).

Na Figura 4 observa-se uma detonação de múltiplas fontes com atrasos na superfície e a posterior formação de uma onda plana em profundidade sobre nosso objetivo, o reservatório no topo do anticlinal mais inferior.

Reverse Time Migration

A Migração RTM, baseada no princípio da reversibilidade temporal, pode ser resumida como dois problemas de condição de contorno associados a uma condição de imagem onde as condições de contorno são a fonte explosiva na superfície no ponto (ou nos

pontos) de detonação e o registro do campo de pressão feito na superfície de observação pelos geofones ou hidrofones e a condição de imagem, o tempo de trânsito da onda direta (TD) para cada posição do modelo.

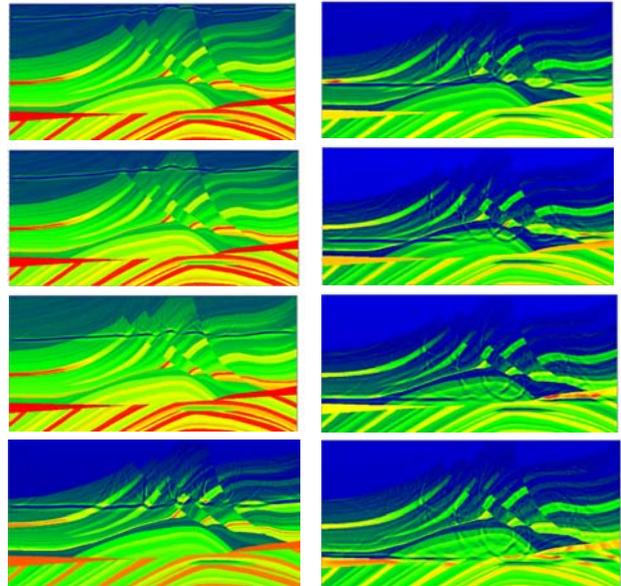


Figura 4 – Detonação de múltiplas fontes com atrasos formando uma onda plana acima do anticlinal inferior do modelo Marmousi.

O sismograma, campo de onda registrado na superfície durante o intervalo de aquisição, é dado pela Equação 7. Já a condição de imagem, pode ser obtida por diversos métodos. Nesse trabalho utilizou-se o critério das máximas amplitudes (Botelho e Stoffa, 1988). Segundo este critério, a cada passo de tempo t , quando o campo em cada ponto (x,z) é recalculado, o algoritmo analisa se o campo nesse novo passo de tempo é maior que o anterior. Caso seja, ele grava este valor como o campo de máxima amplitude $u_{max}(x,z)$ no ponto (x,z) e atribui este passo de tempo t como a condição de imagem no ponto (x,z) .

A propagação reversa no tempo da família de múltiplas fontes é realizada através da solução da equação diferencial:

$$\nabla^2 u(x, z, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = SIS(x, z = z_{OBS}, t; x_i), \quad (8)$$

onde cada traço do sismograma é reinjetado na posição x_i de cada receptor. A migração de cada registro de múltiplas fontes é dada por:

$$m(x, z; \hat{t}_i) = u(x, z, t = TD(x, z; \hat{t}_i)), \quad (9)$$

e

$$M(x, z) = \sum_{i=1}^p m(x, z; \hat{t}_i) \quad (10)$$

representa o somatório de todas as migrações obtidas com p valores de atrasos dados por \hat{t}_i .

Phase Shift Plus Interpolation

A Migração PSPI é um poderoso método de migração baseado na solução da equação da onda. Ela consiste em um aperfeiçoamento do método *Phase-Shift* (no qual há a imposição de que a velocidade do meio não varie lateralmente). No método PSPI há inicialmente a escolha, para cada nível em profundidade, das chamadas *velocidades de referência*. Para cada uma dessas velocidades é calculado um campo de onda, denominado *campo de referência*. Através desses campos e que se realizam as interpolações que rendem o campo de onda extrapolado em profundidade.

Os campos de referência são calculados através do chamado operador *phase-shift*:

$$\tilde{u}(k_x, z + \Delta z, \omega) = e^{\pm ik_z \Delta z} \cdot \tilde{u}(k_x, z, \omega), \quad (11)$$

que é utilizado em dados no domínio frequência-número de onda ($\omega-k_x$). Por essa razão o sismograma é levado inicialmente para este domínio através de uma transformada dupla de Fourier (Na prática utilizam-se algoritmos de Transformada Rápida de Fourier – *FFT*).

Calculados os n campos de referência de cada nível em profundidade z , referentes cada um as n velocidades de referência escolhidas:

$$\tilde{u}(k_x, z = z_{OBS}, \omega) \xrightarrow{\cdot e^{-ik_z z}} \begin{cases} \text{Para } v_1 \rightarrow \tilde{u}_1(k_x, z + \Delta z, \omega) \\ \text{Para } v_2 \rightarrow \tilde{u}_2(k_x, z + \Delta z, \omega) \\ \dots \\ \text{Para } v_n \rightarrow \tilde{u}_n(k_x, z + \Delta z, \omega) \end{cases} \quad (12)$$

realiza-se uma Transformada Inversa de Fourier sobre esses campos para que estes voltem para o domínio $\omega-x$. Finalmente a seção migrada, referente a uma determina inclinação, é obtida pela imposição da condição de imagem, ou seja:

$$m(x, z; \hat{t}_i) = \sum_{\omega} e^{i\omega \hat{t}_i D(x, z; \hat{t}_i)} \tilde{U}(x, z, \omega) \quad (13)$$

A migração final encontrada utilizando p famílias de múltiplas fontes é dada pela soma,

$$M(x, z) = \sum_{i=1}^p m(x, z; \hat{t}_i) \quad (14)$$

Resultados

A primeira comparação que faremos é com relação à imagem obtida, utilizando-se um único

registro de múltiplas fontes, com atrasos nulos ($\hat{t}_i = 0$), pelos métodos de migração RTM e PSPI (Figura 4).

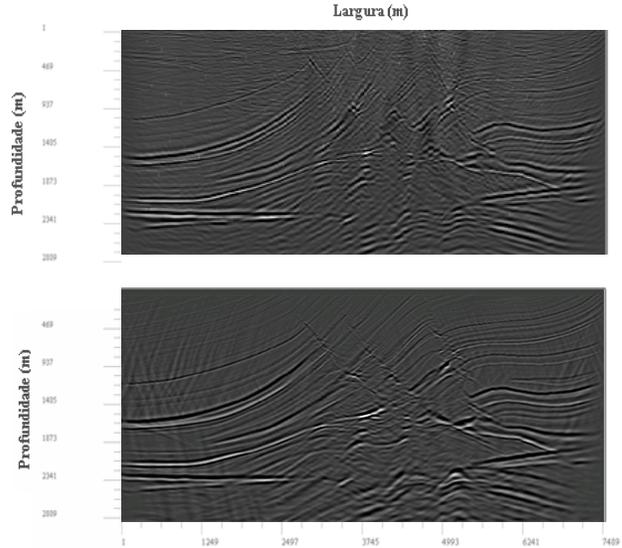


Figura 4 – Seções migradas do modelo Marmousi pelos métodos RTM (acima) e PSPI.

Deve-se ressaltar que a migração deste único registro de múltiplas fontes, em uma boa estação (como a utilizada neste trabalho - Sun com dois processadores AMD 64 bits Oteron de 2.4 GHz e 4 GB de memória) tem um custo de cerca de 1 minuto com o método RTM e pouco mais de 2 minutos para o PSPI, demonstrando o quanto a técnica mostra-se não uma alternativa futura ao processamento sísmico mais uma alternativa real hoje, pois com um fluxo muito simples e num tempo computacional extremamente baixo obtêm-se resultados comparáveis aos obtidos nas formais habituais de processamento.

Nota-se que a parte superior do modelo é muito bem imageada por ambos os métodos. Os anticlinais e o reservatório, porém não seguem esta linha e são por isso candidatos a foco principal da migração orientada ao alvo.

Para não realizar os mesmos testes com ambos métodos de migração foi analisada a relação entre o custo computacional de ambos os métodos. Em situações normais, com a amostragem temporal e a distancia entre estações receptoras de uma aquisição terrestre, por exemplo, (em torno de 4 ms e 40 a 50 m, respectivamente), o método PSPI leva sensível vantagem sobre o RTM. Entretanto, quando manipulam-se dados com amostragens mais curtas e distancias entre receptores menores, como no caso de algumas aquisições marinhas 3D, o volume de dados aumenta drasticamente assim como o peso das transformadas de Fourier realizadas no método PSPI. Sobre este prisma, foram realizados testes com malhas bastante densas (10 a 15m de distancia ponto a ponto) e amostragens temporais bem curtas (próximas a 0,5

ms) que mostraram certa superioridade do método de diferenças finitas.

Feita essa constatação, como desejávamos obter mais seções de registros de múltiplas fontes, escolheu-se o método RTM para o passo seguinte, que era obter um número mínimo de famílias de múltiplas fontes que rendesse uma imagem mais fidedigna ao modelo.

A Figura 5 mostra o empilhamento de 5 seções migradas: uma com detonação de uma onda plana horizontal, três com diferentes inclinações para esquerda e três com diferentes inclinações para direita.

Percebe-se claramente a sensível melhora no imageamento, principalmente dos anticlinais e da zona inferior à oeste do modelo, que representa um padrão deposicional bem diferente do resto do modelo, com refletores de alto ângulo.

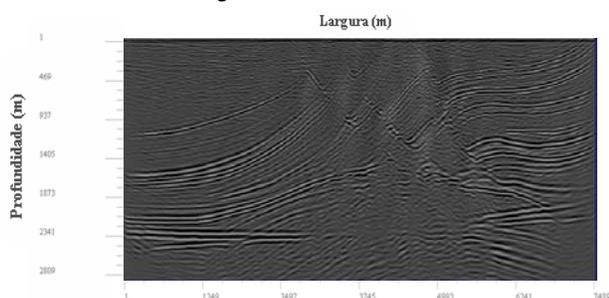


Figura 5 – Empilhamento de seções migradas via RTM do modelo Marmousi referentes a 5 registros de múltiplas fontes detonadas com diferentes atrasos.

Resta agora empilhar as seções orientadas ao alvo. Primeiramente desejávamos melhorar o imageamento do primeiro anticlinal. Para isso mais 5 seções foram geradas, com ondas planas se formando acima do alvo (Figura 6). Novamente uma onda plana horizontal, três com diferentes inclinações para esquerda e três com diferentes inclinações para direita.

Esta seção, portanto já totaliza 10 seções empilhadas. Observa-se claramente que o anticlinal é melhor imageado.

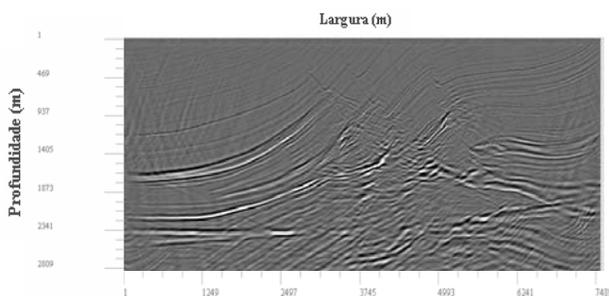


Figura – Empilhamento de 10 seções migradas do modelo Marmousi via RM referentes a 5 registros de múltiplas fontes orientadas ao alvo (alvo: anticlinal superior).

A segunda e última etapa de melhoria do imageamento tem como alvo o segundo anticlinal (Figura 7). Foram utilizadas para obter essas 7 últimas seções as mesmas características de aquisição do anticlinal superior.

Conclusões

Foi possível constatar com os dados obtidos que com apenas um único registro de múltiplas fontes obtêm-se seções de alta qualidade e extremamente fidedignas ao modelo original. O empilhamento de seções migradas de registros de múltiplas fontes com 5 atrasos constantes mostrou que uma sensível melhora

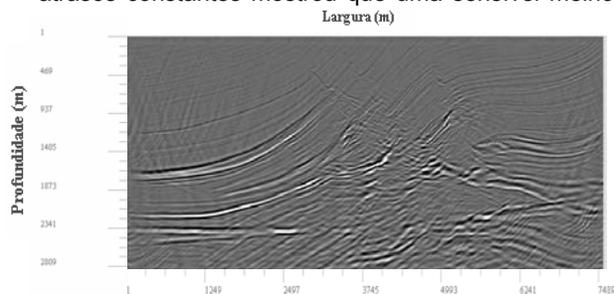


Figura – Empilhamento de 15 seções migradas do modelo Marmousi via RM referentes a 5 registros de múltiplas fontes orientadas ao alvo (alvo: anticlinal inferior).

na imagem final, mostrando que a técnica é capaz de render seções de boa qualidade com baixíssimo custo computacional. A utilização de iluminação controlada se mostrou eficaz quando têm-se áreas muito complexas sobre as quais deseja-se obter maior resolução. Como no caso anterior, com o empilhamento de poucas seções foi possível obter uma substancia melhora na qualidade da imagem final, mostrando que a Migração Orientada ao Alvo é uma ferramenta muito útil quando deseja-se melhorar a qualidade de uma seção migrada, principalmente quando a área em questão é geologicamente complexa, com muitos e intensos contrastes de velocidade.

Referências

BERKHOUT, A. J., 1992. *Areal shot-record technology*, Journal of Seismic Exploration, n.3, 151-264.

BOECHAT, J. B., CUNHA, P. E. M., SOARES FILHO, D. M., BULCÃO, A., MANSUR, W. J., 2005, "Migração RTM orientada ao alvo: experimentos numéricos em modelos envolvendo tectônica salífera", 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, Brazil, Expanded Abstracts.

BOTELHO, M. A. B, STOFFA, P. L., 1988, "Velocity analysis using Reverse Time Migration", Presented at the AGU annual meeting.

CUNHA, P.E.M., PALERMO, L.A.C., 2003, A "Multi-source" version of the Reverse Time Migration (RTM)". Apresentado no 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

MENDES, B. S., SILVA, J. J., MARTINS, E. O., COSTA, J. L., SOARES FILHO, D. M., LANDAU, L., 2005, "Comparison of seismic imaging using PSPI and RTM with multi-source gather records", 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, Brazil, Expanded Abstracts.

MOREIRA, C.A., 2004, "Migração pré-empilhamento em profundidade utilizando ondas planas", Tese de Doutorado, UFBA, Bahia, Brasil.

II Simpósio Brasileiro de Geofísica

II Simpósio Brasileiro da SBGf – Natal