



# Migração reversa no tempo no domínio de ondas planas com compensação de iluminação.

Antonio Edson L. Oliveira<sup>1,3</sup>, Adriano W. G. dos Santos<sup>1</sup> e Reynam C. Pestana<sup>1,2</sup>, 1-CPGG/UFBA, 2-INCT-GP, 3-Petrobras.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<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.

## Resumo

No presente trabalho foi utilizado o método de migração reversa no tempo (RTM) para dados de fonte e de receptor no domínio de ondas planas para se obter imagens de subsuperfície nítidas e com reduzido custo computacional. O método de migração pré-empilhamento testado neste trabalho utiliza como dados de entrada seções de parâmetros de raio constantes, as quais são sintetizadas a partir de famílias de receptor comum. Para melhorar o imageamento nas áreas profundas dos modelos testados, foi aplicada uma compensação de iluminação. Os resultados qualitativos preliminares realizados em dados sintéticos mostram que um volume de dados no domínio de ondas planas equivalentes a um quarto daquele ordenado no domínio do tiro comum já é suficiente para produzir imagens com uma nitidez satisfatória.

## Abstract

In the present study we used the reverse time migration method (RTM) for source and receiver data in the plane waves domain in order to obtain sharp images of subsurface and with reduced computational cost. The pre-stack migration method tested in this work uses as data input constant ray parameter sections, which are synthesized from common receiver gathers. To improve imaging in deep areas of the models, we applied illumination compensation. The preliminary qualitative results obtained from synthetic data show that with the volume of data in plane waves domain equivalent to a quarter of that one in the shot domain is enough to produce good quality subsurface images.

## Introdução

A migração reversa no tempo (RTM) é realizada mediante a extrapolação temporal e a correlação cruzada dos campos de onda de fonte e de receptor. Nesse processo, o campo de fonte é armazenado para todos os instantes de tempo. Como resultado, têm-se grandes volumes de dados para serem correlacionados, o que

limita a eficiência computacional do método. Com relação ao campo registrado, não há grandes problemas no que diz respeito ao custo computacional. Embora o operador RTM tenha eficiência reconhecida, essa característica limitou por muito tempo o seu emprego em larga escala. Atualmente, com a necessidade de se conhecer melhor áreas de geologia complexa, o método RTM tem voltado a ser foco da atenção na indústria. Além disso, o desenvolvimento de modernos centros de processamento utilizando GPU<sup>1</sup> vem proporcionando uma redução significativa no tempo de processamento. Outra alternativa para minimizar o custo computacional é ordenar os dados de entrada para a migração em super-gathers, os quais podem ser obtidos por meio da síntese de ondas planas, a exemplo do que foi apresentado por Liu *et al.* (2002); Zhang *et al.* (2005); Chemingui e Orlovich (2007). Essas características têm justificado o uso comercial do método RTM.

A formulação do método RTM permite o tratamento adequado de eventos complexos, como ondas prismáticas e as reflexões geradas em interfaces com ângulos de mergulho maiores do que 90° (Gray *et al.*, 2001). Essas características justificam a eficiência do método em áreas com geologia complexa, a exemplo daquelas afetadas por tectônica salífera.

No presente trabalho, tendo como foco de mitigar o custo computacional, utilizou-se os dados de entrada para a migração no domínio de ondas planas, as quais foram sintetizadas a partir dos dados no domínio do tiro comum. Os testes foram feitos nos dados sintéticos dos modelos SEG-EAGE e Sigsbee2a, e os resultados preliminares são apresentados neste trabalho.

## Teoria

Um operador de migração de dados sísmicos convencional pode ser considerado como o adjunto de um operador de modelagem sísmica direta (Claerbout, 1992). Desse modo, assumindo que o operador de modelagem direta linear  $\mathbf{G}$  satisfaz o relacionamento

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m} \quad (1)$$

em que onde  $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_M)^T$  é o vetor das observações,  $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_N)^T$  é o vetor dos parâmetros, e  $\mathbf{G}$  é a matriz ( $m \times n$ ) que relaciona o espaço do modelo com o espaço dos dados. O resultado da inversão ou migração por mínimos quadrados (LSM<sup>2</sup>) ( $\mathbf{m}_{mq}$ ) no domínio do modelo pode ser descrita por:

$$\mathbf{m}_{mq} = [\mathbf{G}^T\mathbf{G}]^{-1}\mathbf{G}^T\mathbf{d} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Do inglês *Graphics Processing Unit*

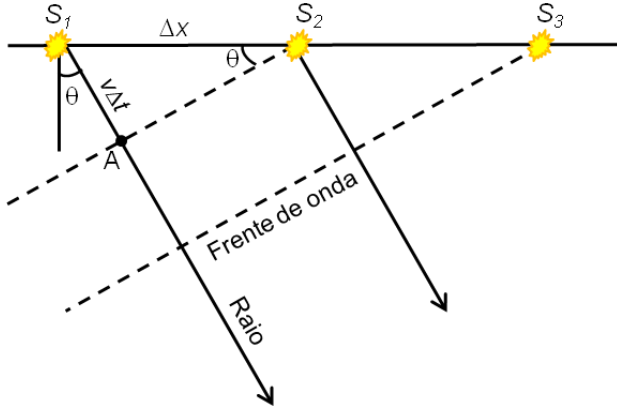
<sup>2</sup> Do inglês *Least-Square Migration*

na qual  $\mathbf{G}^T$  é a transposta da matriz  $\mathbf{G}$ . O operador de migração RTM convencional ( $\mathbf{m}_r$ ) pode ser obtido considerando-se que  $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} = \mathbf{I}$ . Então:

$$\mathbf{m}_r = \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (3)$$

A comparação do resultado do método LSM (equação 2) com o resultado do método usual (equação 3) sugere que o método de LSM fornece uma imagem de maior resolução. O problema é que  $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1}$  é o operador inverso da matriz Hessiana e o seu cálculo é difícil e possui um elevado maior custo computacional. Desse modo, no presente trabalho, o operador de inverso ( $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1}$ ) foi substituído por uma aproximação de iluminação de ondas planas e para migração ( $\mathbf{G}^T$ ) foi utilizado operador RTM no domínio de ondas planas, semelhante ao que foi proposto por Chen e Wang (2010).

O conceito fundamental envolvido na migração de ondas planas é combinação de diferente registros após a aplicação de um atraso de tempo linear aos dados de superfície, baseada no intervalo entre os pontos de tiro em relação a um ponto de referência. Assim, os dados sísmicos de superfície registrados a partir de fontes pontuais são sinterizados em dados de ondas planas com diferentes ângulos de incidência em relação à superfície. Cada onda plana assim gerada está associada a um valor de parâmetro de raio ( $p$ ), onde  $p = \text{sen}\theta/v$ , sendo  $\theta$  o ângulo de propagação da frente de onda plana em relação à vertical (Figura 1) e  $v$  é a sua velocidade de propagação.



**Figura 1** - Geometria das ondas planas oblíquas (Modificado de Yilmaz, 1987).

Na Figura 1  $S$  é a fonte sísmica e  $\Delta x$  é o intervalo entre elas e  $\Delta t$  é o atraso no tempo. Este último parâmetro é dado por:

$$\Delta t_j(p) = p(x_j - x_0) \quad (4)$$

O termo de fonte ( $S_p$ ) da onda plana incidente pode ser expresso como o emplilhamento das assinaturas de fonte de cada tiro com seus respectivos atrasos de tempo (Liu *et al.*, 2002):

$$S_p(x, z = 0, \omega) = \sum_{j=1}^{N_s} S_j(x, z = 0, \omega) W_j(p, \omega) \quad (5)$$

Para o dado registrado, o campo de onda plana é expresso por cada família de receptor comum (*receiver gather*), com seus respectivos atrasos de tempo:

$$R_p(x, z = 0, \omega) = \sum_{j=1}^{N_s} R(x_s, z = 0, \omega) W_j(p, \omega) \quad (6)$$

Nas equações 5 e 6  $W_j = \exp(i\omega\Delta t_j)$  é a função de atraso no domínio da frequência. Aplicando-se a transformada de Fourier inversa no domínio do tempo, pode-se obter as seções de ondas planas para fonte  $S_p(x, z = 0, t)$  e receptor  $R_p(x, z = 0, t)$  no domínio do tempo. A condição de imagem para uma única família de onda plana é obtida por:

$$I_p(x, z, p) = \sum_{\omega} S_p^*(x, z, \omega) R_p(x, z, \omega) \quad (7)$$

na qual o símbolo \* corresponde a operação de conjugado complexo. A imagem final no domínio de ondas planas é dada por:

$$I(x, z) = \sum_p I(p, x, z) \quad (8)$$

No que diz respeito à compensação de iluminação no domínio do parâmetro de onda plana, Chen e Wang (2010) apresentam a seguinte solução:

$$I_c(x, z) = \sum_p \frac{I(p, x, z)}{\text{Dim}(p, x, z) + \varepsilon} \quad (9)$$

na qual  $\varepsilon$  é um número pequeno e positivo que mantém compensação de iluminação estável, e  $I_c(x, z)$  é a migração de ondas plana com compensação de iluminação. O termo  $\text{Dim}(p, x, z)$  tem relação com as distribuições de energia dos campos de onda de fonte e de receptor, e é considerado como uma aproximação da matriz Hessiana. Sua expressão é dada por:

$$\text{Dim}(p, x, z) = [E_s(p, x, z)E_r(p, x, z)]^{1/2} \quad (10)$$

na qual  $E_s$  e  $E_r$  representam as distribuições de energia para os campos de onda de fonte e de receptor, respectivamente.

## Metodologia

Os testes de eficiência da migração RTM com compensação de iluminação no domínio de ondas planas foram feitos nos modelos 2D SEG/EAGE (*salt model*) e Sigsbee2A da SMAART JV. Estes modelos apresentam várias características inerentes a ambientes afetados por tectônica salífera, tais como múltiplas interfaces, mergulhos íngremes e fortes variações laterais e verticais de velocidades. Portanto, retratam áreas de alta complexidade geológica, e representam uma importante referência para o teste de ferramentas de imageamento, especialmente nas áreas localizadas abaixo dos domos salíferos.

As Figuras 2a e 2b apresentam os campos da fonte e dos receptores no domínio de ondas planas correspondentes ao parâmetro de raio  $p = -0,0003$  s/m, e a Figura 3c o campo de velocidades do Modelo 2D SEG/EAGE.

## Resultados

Os resultados da migração convencional e com compensação de iluminação referentes ao modelo 2D SEG/EAGE são apresentados nas Figuras 3a e 3b, respectivamente. Em ambos os casos, os dados foram migrados com os seguintes parâmetros:  $p = \pm 0,0003$  s/m,  $\Delta p = 0,00001$  s/m, usando-se 61 ondas planas, ou seja,  $N_p = 61$ . Na Figura 3b, nota-se uma nítida melhoria na nitidez da imagem para as áreas mais profundas do modelo. Outro teste realizado foi a geração de famílias de imagens comuns (*common image gather* - CIG). A utilização de CIGs é um procedimento usual para o controle de qualidade do campo de velocidades de migração, que consiste na produção de imagens a partir dos dados de *multi-offset* migrados. Quando a velocidade está correta, os dados ordenados em CIGs ficarão horizontalizados após a migração pré-empilhamento, se a velocidade estiver correta (Liner, 2003). A Figura 4a mostra o resultado do empilhamento dos CIGs do dado SEG/EAGE, enquanto a Figura 4b, alguns CIGs no domínio do parâmetro de raio, onde é possível observar os eventos horizontalizados. Para modelo Sigsbee2A, são apresentados os resultados referentes aos parâmetros:  $p = \pm 0,0003$  s/m,  $\Delta p = 0,000007$  s/m,  $N_p = 81$ . A Figura 5a corresponde ao resultado da migração convencional, ou seja, sem iluminação, e a Figuras 5b, àquela com compensação de iluminação. Mais uma vez percebe-se uma nítida melhoria na qualidade da imagem para as áreas profundas do modelo, inclusive sendo possível identificar alguns pontos difratores localizados abaixo do corpo salífero.

## Conclusões

Os resultados obtidos até o momento mostram que a migração RTM, no domínio de ondas planas com compensação de iluminação, pode ser uma ferramenta útil na obtenção de imagens nítidas e confiáveis, e com um custo computacional menor do que aquela realizada no domínio do tiro. Eles representam a primeira fase de um trabalho que tem sido desenvolvido no âmbito de uma pesquisa de mestrado. Na etapa seguinte, pretende-se inverter dados sísmicos, sintetizados na forma de ondas planas, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, através da técnica LSM. Associado a ele, pretende-se utilizar o algoritmo de otimização iterativo do gradiente conjugado, cujo objetivo será acelerar a busca do modelo que melhor se ajusta aos dados de entrada.

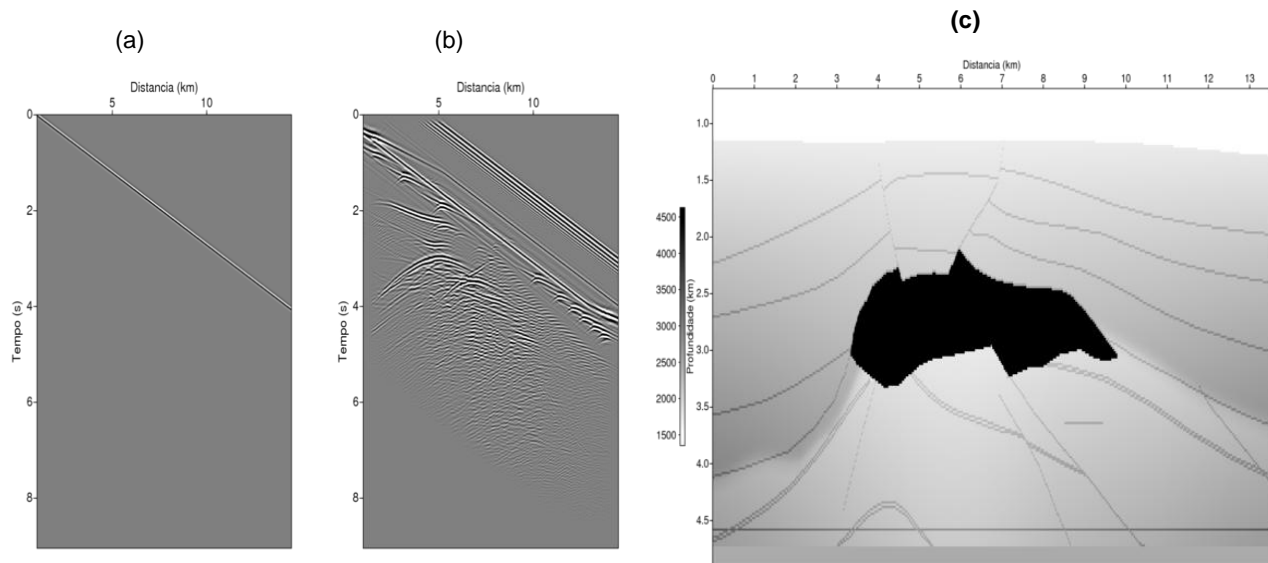
## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CPGG/UFBA, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT-GP) e a

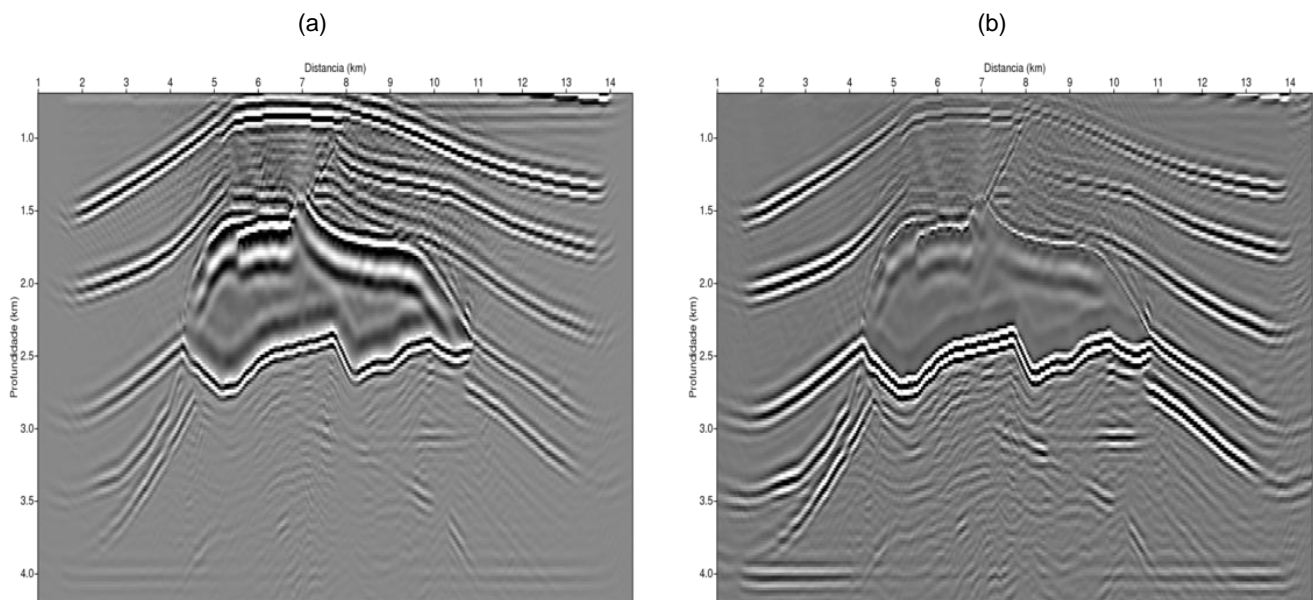
Petrobras pelo apoio para a realização deste trabalho de pesquisa.

## Referências

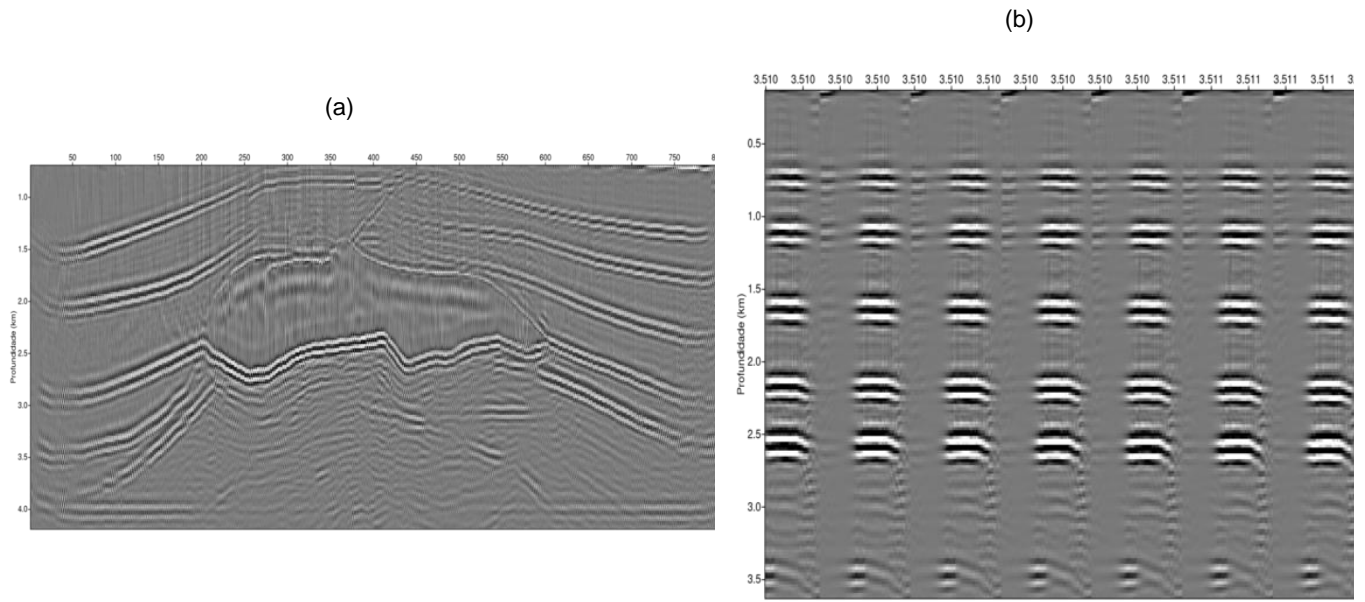
- Chen Sheng-Chang e Wang Han-Chuang. Migration Compensation with Plane Wave Illumination. Chinese Journal of Geophysics, 2010 53(4): 583–589.
- Chemingui, N., R. V. Borselen e Orlovich, M., 2007, 3D plane-wave migration of wide-azimuth data: 77th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2195–2199.
- Clearbout, J. F., 1992, Earth soundings analysis: Processing versus inversion, Blackwell Scientific Publications, Inc., Stanford-USA.
- Gray, S. H., J. Etgen, J. Dellinger, e D. Whitmore, 2001, Seismic migration problems and solutions: Geophysics, 66, 1662–1640.
- Liner, C. L., 2003, Elements of 3D Seismology, PennWell Corporation, Tulsa, USA.
- Liu, F., R. H. Stolt, D. W. Hanson, e R. S. Day, 2002, Planewave source composition: An accurate phase encoding scheme for prestack migration: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1156–1163.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. 1. ed. SEG: Society Exploration Geophysicists.
- Zhang, Y., J. Sun, C. Nottfors, S. H. Gray, L. Chernis, e J. Young, 2005, Delayed-shot 3D depth migration: Geophysics, 70, E21–E28.



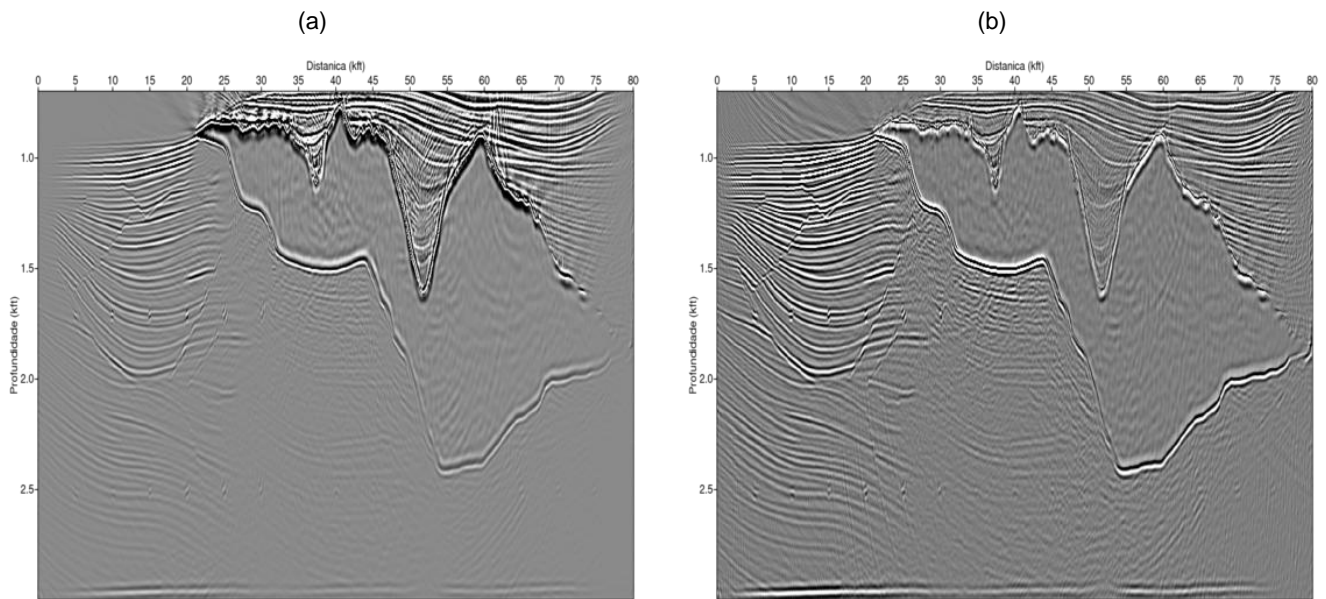
**Figura 2** – Campos da fonte (a) e dos receptores (b) no domínio das ondas planas correspondentes ao parâmetro de raio  $p = -0,0003$  s/m. Em (c), é apresentado o campo de velocidade do modelo 2D SEG/EAGE.



**Figura 3** – Resultado da migração reversa no tempo no domínio de ondas planas para o modelo 2D SEG/EAGE. Resultado da migração sem iluminação (a) e com compensação de iluminação (b). Parâmetros:  $p = \pm 0,0003$  s/m,  $\Delta p = 0,00001$  s/m, com 61 ondas planas ( $N_p = 61$ ).



**Figura 4** – Migração pelo método RTM no domínio de ondas planas com compensação de iluminação do dado 2D SEG/EAGE. Em (a), o resultado final do empilhamento de todas as CIGs e algumas seções de CIGs (b). Parâmetros:  $p = \pm 0,0003$  s/m,  $\Delta p = 0,00001$  s/m,  $N_p = 61$ .



**Figura 5** – Resultado RTM no domínio de ondas planas para o modelo Sigsbee2A. Resultado da migração convencional (a) e com compensação de iluminação (b). Parâmetros:  $p = \pm 0,0003$  s/m,  $\Delta p = 0,000007$  s/m;  $N_p = 81$ .