

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Utilização de Métodos Integrais para Extrapolação de Campo de Ondas Acústico

AUTORES:

Márcio de Araújo Martins¹, Josias José da Silva¹, Luiz Landau¹, Djalma Manoel Soares Filho²

INSTITUIÇÃO:

1-COPPE/UFRJ 2-PETROBRAS

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Utilização de Métodos Integrais para Extrapolação de Campo de Ondas Acústico

Abstract

This study aims to examine the extrapolation of the acoustic wave field, recorded in a seismic survey, based on the integral solution of the wave equation. Both the modeling stage as the migration of seismic data depends on the extrapolation of the wave field, being this issue fundamental to the subsurface imaging. The extrapolation integrals are obtained from Kirchhoff-Helmholtz's integral, from these were analyzed the necessary considerations for its implementation in seismic event. The wave field extrapolation is divided into forward and backward, in this work we analyze the forward and backward extrapolation and apply this technique to homogeneous and nonhomogeneous media.

Introdução

O objetivo de um levantamento sísmico é a obtenção de informações sobre a conformação das camadas geológicas em subsuperfície, assim como de suas propriedades físicas. Todo o processo de imageamento tem como base a propagação de ondas sísmicas através das camadas geológicas em subsuperfície e se divide em aquisição, processamento e interpretação dos dados registrados na superfície. A etapa de migração dos dados está dentro do processamento e consiste no correto posicionamento dos refletores em subsuperfície, a partir do sismograma, seja esse posicionamento em profundidade ou em tempo. Para a realização da migração em profundidade necessita-se de duas extrapolações do campo de onda, direta e inversa, mais uma condição de imagem MARTINS (2008). Dentre os métodos de extrapolação do campo de onda estão os que se baseiam na solução da equação da onda podendo essa ser uma solução diferencial ou uma solução integral. O método de extrapolação utilizando soluções diferenciais baseia-se na série de Taylor, já o método utilizando soluções integrais, que é o foco desse trabalho, baseia-se no Princípio da Reciprocidade de Rayleigh e na função de Green do problema. O ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho é a integral de Kirchhoff-Helmholtz para o caso acústico descrito em WAPENAAR & BERKHOUT (1989).

Metodologia

Extrapolação Direta do Campo de Onda Acústico

Considere um campo de onda que se propaga em um determinado meio de propagação. A integral de Kirchhoff-Helmholtz atesta que de posse do campo de onda acústico P sobre uma superfície fechada S e da resposta impulsiva do meio de propagação (função de Green do meio) G , é possível calcular o campo de onda acústico P_A em um ponto A qualquer interior ao volume delimitado por esta superfície (WAPENAAR & BERKHOUT 1989), A Figura 1 ilustra tal situação.

No domínio da frequência, a equação de Kirchhoff-Helmholtz escreve-se

$$P(\vec{r}_A, \omega) = \oint_S \left[G \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - P \left(\frac{1}{\rho} \nabla G \right) \right] \cdot \vec{n} \, dS, \quad (1)$$

onde $G = G(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega)$ é a função de Green sobre a superfície S para uma fonte impulsiva localizada no ponto A , $P = P(\vec{r}, \omega)$ é o valor do campo de onda sobre a superfície S para uma fonte localizada fora da mesma, ρ é a densidade do meio de propagação, $\vec{n}$ é o vetor normal a superfície e $P(\vec{r}_A, \omega)$ é o campo de onda acústico no ponto A interior a S .

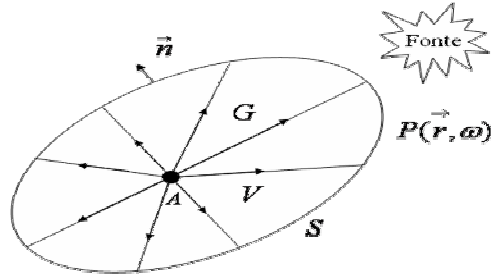


Figura 1 - Representação do campo de onda acústico e do campo de onda de Green direto sobre a superfície S. O campo de onda em qualquer ponto A, interior a S, pode ser calculado em função do campo de onda e da função de Green sobre tal superfície.

Condições de Contorno para a Função de Green

As condições de contorno consideradas para a Função de Green são condições não-reflexivas sobre a superfície S, pois ao se considerar as condições de Dirichlet ou de Neumann (condições exclusivamente reflexivas) observa-se um alto grau de instabilidade na reconstrução do campo de ondas (WAPENAAR & BERKHOUT 1989). Ao se considerar a superfície S como exclusivamente não-reflexiva, plana, horizontal e infinita, Figura 2, pode-se escrever a equação (1) da seguinte forma

$$P(\vec{r}_A, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial G^-}{\partial z} P - G^- \frac{\partial P}{\partial z} \right]_{z=z_0} dx dy, \quad (2)$$

onde $G^-(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega)$ é a função de Green puramente ascendente sobre a superfície de observação z_0 , pois o semi-espaco superior a tal superfície é tomado livre de reflexões. O campo de ondas acústico sobre a superfície z_0 é

$$P(\vec{r}, \omega) = P^+(\vec{r}, \omega) + P^-(\vec{r}, \omega) \text{ em } z = z_0, \quad (3)$$

onde $P^+(\vec{r}, \omega)$ é o campo de ondas descendente e $P^-(\vec{r}, \omega)$ é o campo de ondas ascendente sobre a superfície $z = z_0$. Considerando as equações (2) e (3), pode-se demonstrar a partir da integral de Kirchhoff-Helmholtz escreve-se:

$$P(\vec{r}_A, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2}{\rho} \left[\frac{\partial G^-}{\partial z} P^+ \right]_{z=z_0} dx dy \quad (4)$$

ou

$$P(\vec{r}_A, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{-2}{\rho} \left[G^- \frac{\partial P^+}{\partial z} \right]_{z=z_0} dx dy. \quad (5)$$

As equações (4) e (5) são conhecidas por Integrais de Rayleigh unidirecionais e são válidas para meios acústicos arbitrariamente heterogêneos. As integrais de Rayleigh unidirecionais para extrapolação direta do campo de ondas, permitem calcular o campo extrapolado total P em função do campo de Green ascendente G^- e do campo de onda físico descendente P^+ , sobre a superfície de observação.

A Figura 2 ilustra a situação onde uma fonte gera um campo de ondas que se propaga em determinado meio e é registrado sobre a superfície de observação z_0 . Deseja-se, a partir do campo registrado em z_0 , determinar qual será o campo de ondas em um ponto A qualquer abaixo da superfície de observação. Tendo a função de Green do meio de propagação, pode-se realizar tal extrapolação através das Integrais de Rayleigh

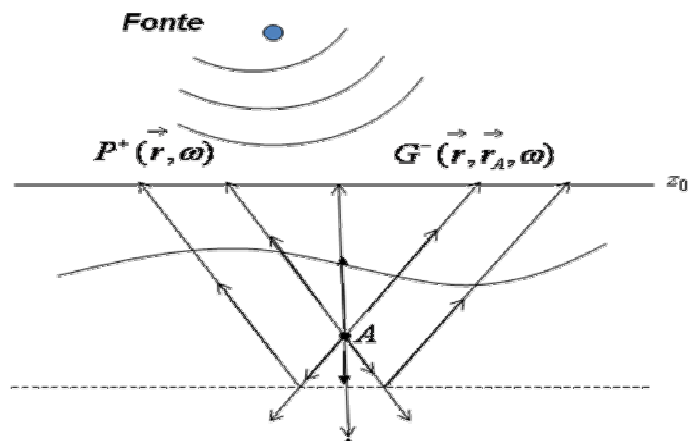


Figura 2 Esquema representando o campo de onda físico real e o campo de ondas de Green.

A extrapolação direta do campo de ondas pode ser realizada utilizando-se tanto a equação (4) como a (5). Inicialmente utilizou-se a equação (4) em virtude de a mesma ser calculada em função do campo de ondas e não de sua derivada normal. A obtenção dos dados de entrada P^+ e $\frac{\partial G^-}{\partial z}$ para a utilização da Integral de Rayleigh foi feita por modelagem numérica da propagação de ondas acústicas, utilizando o método das diferenças finitas (FDM) com aproximações de quarta ordem no espaço e segunda ordem no tempo (referência). A fonte do campo de ondas utilizada foi a segunda derivada da função gaussiana (Cunha), o modelo de velocidades utilizado foi o homogêneo e um de duas camadas paralelas, possuindo 600 pontos na direção horizontal e 300 pontos na direção vertical, com espaçamento entre pontos da malha $\Delta x = \Delta z = h$. A integral de Rayleigh, no domínio do tempo, é uma integral de convolução entre o campo de onda físico e a função de Green. Portanto, para se obter o campo de ondas no ponto A, basta realizar a convolução desses dados traço a traço e depois somar todos os traços do resultado da convolução VERSCHUUR (2006).

Extrapolação Inversa do Campo de Ondas Acústico

Considere a situação de uma aquisição sísmica representada na Figura 3. Nesta situação, considerando heterogeneidades no interior do modelo, tem-se o campo de ondas oriundo da fonte sísmica incidindo sobre tais heterogeneidades, gerando um novo campo de ondas espalhado, ou seja, as heterogeneidades se comportam como fonte secundária quando interagem com o campo de ondas incidente.

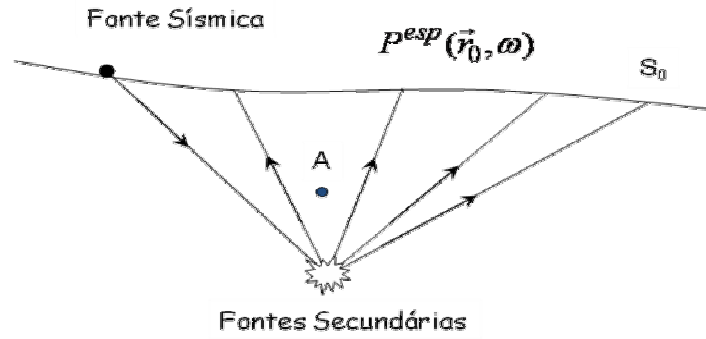


Figura 3 - Situação de uma aquisição sísmica, em que um campo de onda incide em um objeto, é espalhado e registrado na superfície.

O objetivo aqui é, a partir do campo espalhado $P^{esp}(\vec{r}_0, \omega)$, registrado na superfície, reconstruir o campo de onda espalhado em um ponto A interior ao modelo, ou seja, em subsuperfície. O sentido da extrapolação é do campo de ondas espalhado registrado na superfície S_0 , em um instante t , para o campo espalhado no ponto A, em um instante $t - \Delta t$. Esse processo chama-se extrapolação inversa do campo de ondas e é fundamental para a etapa de migração de dados sísmicos.

Pode-se demonstrar que, no domínio da frequência, a extrapolação para um ponto A, do campo de ondas registrado sobre a superfície S também pode ser realizada de posse do complexo conjugado da Função de Green do meio de propagação WAPENAAR (1989).

Assim, no domínio da frequência, a equação de Kirchhoff-Helmholtz escreve-se,

$$P(\vec{r}_A, \omega) = \oint_S \left[G^* \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - P \left(\frac{1}{\rho} \nabla G^* \right) \right] \cdot \vec{n} \, dS \quad , \quad (6)$$

onde $G^* = G^*(\vec{r}, \vec{r}_A, \omega)$ é o conjugado da Função de Green sobre a superfície S para uma fonte impulsiva localizada no ponto A, $P = P(\vec{r}, \omega)$ é o valor do campo de onda sobre a superfície S para uma fonte localizada fora da mesma, ρ é a densidade do meio de propagação, $\vec{n}$ é o vetor normal a superfície e $P(\vec{r}_A, \omega)$ é o campo de onda acústico no ponto A interior a S. Como já mencionado, em uma aquisição sísmica, o campo refletido nas camadas geológicas é registrado em uma superfície de aquisição aberta, discreta e finita, fazendo-se necessário uma análise das condições sob as quais pode-se utilizar tal equação para a extrapolação inversa de dados sísmicos.

Para tal análise considere, para a superfície S, a geometria apresentada na Figura (4). Nessa geometria, a superfície é dividida em superfície de aquisição S_0 , a superfície plana S_1 , e a superfície cilíndrica S_2 , com eixo vertical passando por A e raio R. O campo de onda físico é originado em um objeto espalhador (fonte secundária) em subsuperfície, abaixo de S_1 . O objetivo principal é encontrar uma expressão que descreva o campo de onda espalhado no ponto A, em subsuperfície, em função do campo e sua derivada normal sobre a superfície de aquisição S_0 . A partir da equação (6), percebe-se que a contribuição da integral sobre a superfície S_2 tende a zero quando R tende a infinito (a superfície cilíndrica é proporcional a R e o integrando proporcional a, pelo menos, $1/R^2$) WAPENAAR & BERKHOUT (1989). Portanto, o campo de onda no ponto A pode ser expresso pela contribuição da integral sobre a superfície S_0 mais a integral sobre a superfície S_1 , ou seja,

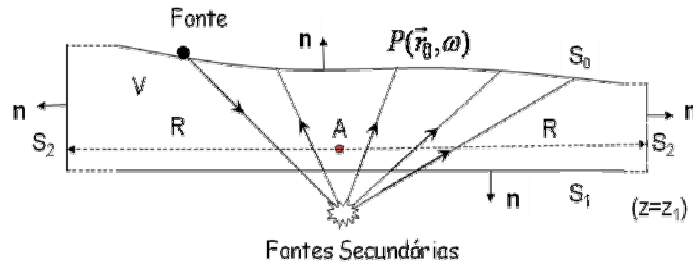


Figura 4 - Geometria considerada para a análise da extrapolação inversa do campo de ondas espalhado em subsuperfície e registrado em S_0 .

$$P(\vec{r}_A, \omega) = P_0(\vec{r}_A, \omega) + \Delta P(\vec{r}_A, \omega) \quad , \quad (7)$$

onde

$$P_0(\vec{r}_A, \omega) = \int_{S_0} \left[G^* \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - P \left(\frac{1}{\rho} \nabla G^* \right) \right] \cdot \vec{n} \, dS \quad (8)$$

e

$$\Delta P(\vec{r}_A, \omega) = \int_{S_1} \left[G^* \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) - P \left(\frac{1}{\rho} \nabla G^* \right) \right] \cdot \vec{n} \, dS \quad . \quad (9)$$

Quando o termo $\Delta P(\vec{r}_A, \omega)$ puder ser descartado, ou seja, quando a integral sobre a superfície S_1 tiver pouca influência sobre o campo de onda no ponto A, a equação (8) descreverá a extrapolação inversa do campo de onda da superfície de aquisição S_0 para o ponto A em subsuperfície. Conforme descrito e MARTINS (2008), para o campo de onda de Green pode-se escolher qualquer meio de referência abaixo de z_1 , ou seja, fora do volume V. Assim, ao se escolher $c(x, y, z > z_1) = c(x, y, z_1)$ e $\rho(x, y, z > z_1) = \rho(x, y, z_1)$, o campo de onda de Green na superfície z_1 é puramente descendente, permitindo escrever

$$\Delta P(\vec{r}_A, \omega) \approx -2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\rho} \frac{\partial (G^+)^*}{\partial z} P^+ \, dx \, dy \quad . \quad (10)$$

O resultado apresentado pela equação (10) é bastante importante, e segundo ele somente os campos de onda $(G^+)^*$ e P^+ que se propagam em direções opostas, sobre a superfície z_1 , é que contribuem para o termo $\Delta P(\vec{r}_A, \omega)$, que se entende por ser o termo diferença entre o valor do campo de onda real no ponto A, e o valor do campo extrapolado, utilizando-se somente o registro na superfície de aquisição S_0 . No domínio do tempo, a expressão (8) é escrita como a correlação entre o campo de ondas registrado na superfície de observação espalhado por uma fonte secundária em subsuperfície e a Função de Green, registrada também na superfície de observação, relativa a uma fonte impulsiva sobre o ponto A para onde se deseja extrapolar o campo VERSCHUUR (2006).

Resultados e Discussão

Utilizando um meio de propagação homogêneo com velocidade de 1500 m/s e 600x300 pontos de malha, detonou-se uma fonte posicionada em $x=200$ e $z=3$ cujo campo gerado foi registrado na superfície de observação $z_0=150$. Deseja-se, a partir do campo registrado em z_0 , estimar qual será o campo no ponto A de coordenadas $x=300$ e $z=220$. O campo de ondas registrado em z_0 esta mostrado na Figura 5(a).

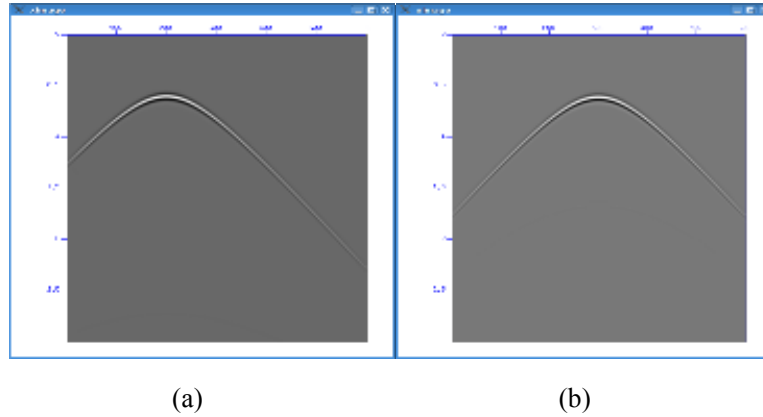


Figura 5 – (a) Campo de ondas registrado na posição $z_0=150$, para uma fonte na superfície, no o meio de propagação homogêneo e (b) derivada da Função de Green.

Para se extrapolar o campo de ondas necessita-se da derivada da função de Green do meio de propagação. Para a obtenção da mesma foi detonada fontes no ponto para o qual se deseja extrapolar o campo ($x=300$ e $z=225$), e o registro feito na mesma superfície z_0 . O resultado está mostrado na Figura 5(b). (Função de Green convolvida com a fonte utilizada).

Para se obter o campo de ondas extrapolado, inicialmente realiza-se a convolução do campo de ondas direto com a derivada da Função de Green e posteriormente soma-se todos os traços do resultado da convolução. O resultado dessa operação está mostrado na Figura 6.

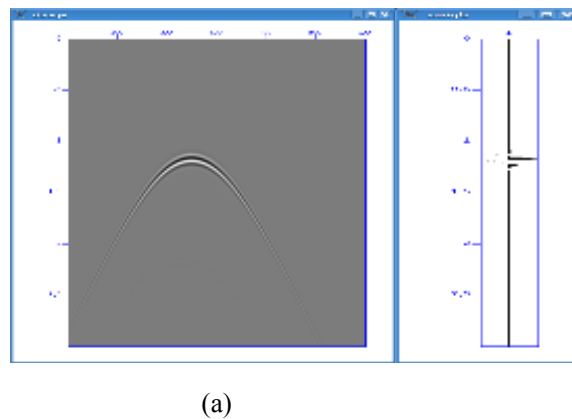


Figura 6 – (a) Resultado da convolução do campo de ondas direto com a derivada da Função de Green (b) soma de todos os traços.

Ao se somar todos os traços do dado mostrado na Figura 6a, obtém-se o campo extrapolado no ponto $x = 300$ e $z = 220$, o qual está mostrado na Figura 6b.

Para a realização da extrapolação inversa do campo de ondas, utilizou-se um modelo de velocidades de camadas paralelas, cujas velocidades de propagação são 1500 m/s e 2500 m/s, Figura 7. Detonou-se uma fonte na superfície na posição $x = 200$ e $z = 5$. Como o meio é heterogêneo, o campo gerado na superfície irá refletir nas interfaces de separação dos dois meio e será registrado na superfície do modelo. A partir do campo registra na superfície, deseja-se determinar o campo na posição $x = 300$ e $z = 220$.

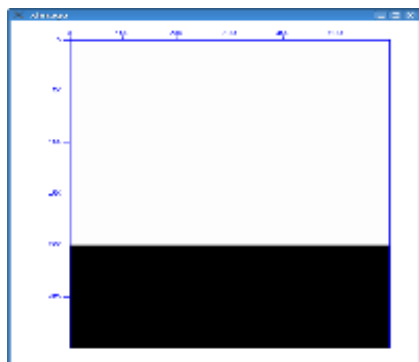


Figura 7 - modelo utilizada para extrapolação inversa do campo de ondas.

O campo de ondas refletido e a derivada da Função de Green estão mostrados nas Figura 8a e 8b respectivamente.

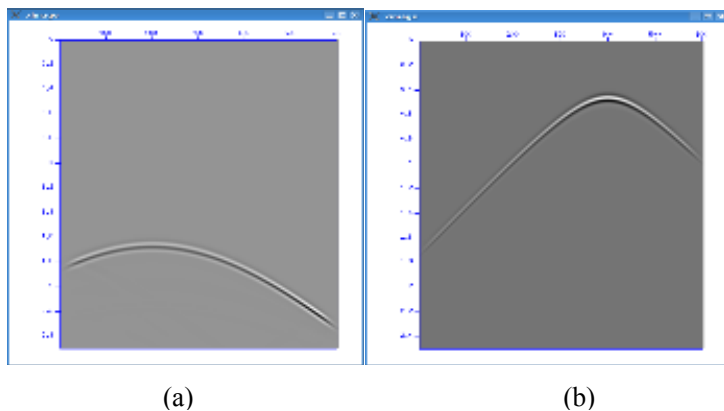


Figura 8 – (a) campo refletido registrado na superfície do modelo. (b) derivada da Função de Green.

Para a extrapolação inversa realiza-se a operação de correlação entre o campo de ondas e a derivada da Função de Green. O resultado dessa operação está mostrado na Figura 9(a) e a soma de todos os traços na 9(b)

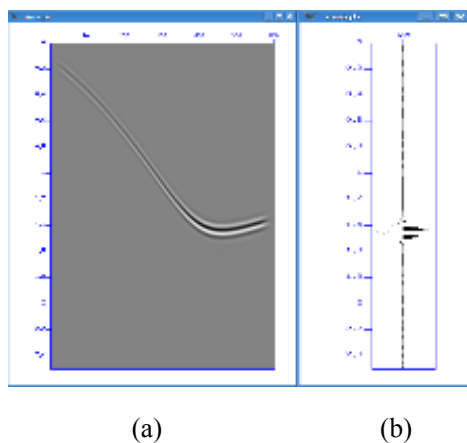


Figura 9 – (a) Resultado da correlação do campo de ondas direto com a derivada da Função de Green. (b) soma de todos os traços.

Conclusões

A técnica de extrapolação de campos de ondas através da Integral de Rayleigh se mostrou bastante eficaz e pode ser utilizada para a implementação de outras técnicas que utilizam a extrapolação, tanto direta como inversa, para atingir seu objetivo, tais como atenuação de múltiplas no dado sísmica, migração dentre outras. Uma análise mais apurada deve ser feita, no sentido de avaliar a amplitude do campo extrapolado. O estudo da implementação da mesma técnica no domínio da frequência e a utilização de notação matricial para a implementação da mesma se mostram como novos estudos a serem realizados a partir dos que foi realizado nesse trabalho até aqui.

Agradecimentos

Agradecimentos a Universidade Federal do Rio de Janeiro, a todo o grupo de Geofísica do Laboratório Multidisciplinar de Modelagem de Bacias sedimentares e a Petrobrás.

Referências Bibliográficas

- BERKHOUT, A.J., WAPENAAR, C.P.A., 1989, One-way version of the Kirchhof integral: Geophysics, 54. 460-467.
- WAPENAAR, C.P.A., PEELS, G.L., BUDEJICKY, V., BERKHOUT, A.J., 1989, Inverse extrapolation of primary seismic waves: Geophysics, 54. 853-863.
- WAPENAAR, C.P.A., BERKHOUT, A.J., 1989, Elastic Wave Field Extrapolation, ELSEVIER.
- VERCHUUR, D.J., 2006, Seismic multiple removal techniques – past, present and future, EAGE Publications.
- MARTINS, M.A., 2008, Extrapolação do Campo de Ondas acústica Utilizando Soluções Integrais da Equação da Onda, Dissertação de Mestrado.