

Comparação dos resultados dos métodos de empilhamentos SRC e CMP (NMO/DMO) aplicados nos dados Marmousi

Garabito, G. (*), Paschoal, W. G., e Lima, A. W., CPGf/UFGA/Brasil
german@ufpa.br, wgpj@ufpa.br

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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.

Abstract

The simulation of zero-offset (ZO) sections from multi-coverage seismic data is widely used in seismic reflection imaging by means of conventional CMP (common-mid-point) stacking method. The recently recently introduced common reflection stack (CRS) method simulates a ZO section from multi-coverage data without explicit knowledge of the macro-velocity model. As a main product this new method produce high resolution ZO sections and three useful kinematic attributes.

We present an application of the CRS stack method to the marmousi dataset. The simulated ZO section is compared with the similar result obtained by conventional CMP (NMO/DMO) stack method. We also present some theoretical aspects to determine the stacking velocities from the CRS stacking attributes. On the other hand, we show the NMO (normal-moveout) correction without stretching effect by using CRS attributes .

Introdução

O processamento de dados sísmicos tem como objetivo gerar uma imagem representativa da estrutura geológica em subsuperfície por meio da aplicação de métodos de imageamento sísmico. Uma imagem da subsuperfície pode ser obtida através de processos de transformação dos dados sísmicos de cobertura múltipla (com afastamento não nulos) para o domínio afastamento nulo (AN) fonte-receptor, através de processos de migração pós e pré-empilhamento no tempo e na profundidade. O presente trabalho trata da simulação de seções AN.

No processamento sísmico a simulação de uma seção AN é realizada rotineiramente por meio do método de empilhamento CMP (*common-midpoint* – ponto médio comum) introduzida por Mayne (1962). Este método consiste na aplicação da correção NMO (*normal-moveout*) nas seções sísmicas CMP e no posterior empilhamento horizontal dos traços sísmicos. A correção NMO depende do conhecimento um único parâmetro que é a velocidade de empilhamento, determinado por um processo iterativo denominando análise de velocidade. Em meios homogêneos com interfaces inclinadas, este processo de empilhamento incluir os efeitos dos ângulos de mergulho das interfaces por meio da aplicação da correção DMO (*Dip-moveout*) (Deregowski, 1986; Hale 1991).

Recentemente foi introduzido um novo método de simulação de seções AN denominado Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (SRC). Este novo método baseado na aproximação de tempos de trânsito de raios paraxiais em torno de um raio central normal, envolve o empilhamento eventos sísmicos contidos em superfícies (ou operadores) de empilhamento definidos por três parâmetros de frentes de ondas hipotéticas que são determinados a partir dos dados pré-empilhados por processos automáticos (Müller, 1999; Jäger *et al.*, 2001; Garabito *et al.*, 2001). O método empilhamento SRC produz seções AN com alta resolução em comparação com os resultados o método CMP, isto devido ao fato de envolver maior quantidade de espalhamento geométrico, determinação do macromodelo de velocidades (Biloti, *et al.*, 2000), extração de difrações (Garabito, 2001), etc.

Neste trabalho, apresentamos os resultados do método de empilhamento SRC, proposto em Garabito, (2001), aplicado aos dados Marmousi. A seção de AN resultante é comparada com sua similar obtida pelo método CMP (NMO/DMO). Por outro lado, a partir dos parâmetros do empilhamento SRC mostra-se a determinação da velocidade de empilhamento, similar ao usada no método CMP. Finalmente mostra-se uma comparação da correção NMO convencional com a correção também NMO, mas usado os parâmetros SRC.

Empilhamento SRC

É um método que permite simular seções sísmicas AN por meio do somatório de eventos sísmicos dos dados de cobertura múltipla contidos nas superfícies de empilhamento e também gera como produto adicional três parâmetros (atributos cinemáticos) de empilhamento SRC.

Para simulação de seções AN através do método de empilhamento SRC é necessário à utilização de uma aproximação (hiperbólica) de segunda ordem para função tempo de trânsito (Schleicher *et al.*, 1993; Tygel *et al.*, 1997). Em meios heterogêneos bidimensionais, com interfaces curvas, a função tempo de trânsito de empilhamento SRC aplicável em dados com arranjos irregulares de fontes e receptores é dado por:

$$t_{\text{hip}}^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left[(x_m - x_0)^2 K_N + h^2 K_{\text{NIP}} \right], \quad [1]$$

onde t_0 é o tempo de trânsito AN; v_0 é a velocidade próxima à linha de aquisição, ou seja, na vizinhança do ponto de referência x_0 do raio central AN. Os tempos de trânsito (t_{hip}) dos raios paraxiais estão em função das coordenadas x_m e h , que denotam o ponto médio e o meio afastamento entre fonte e receptor, respectivamente. As coordenadas x_0 e t_0 representam apenas um ponto de amostragem na seção AN a ser simulada e para cada ponto de amostragem (x_0 , t_0) é associado o trio de parâmetros de empilhamento SRC, β_0 (ângulo de emergência do raio de reflexão normal em relação à normal da linha de aquisição), K_{NIP} (curvatura da frente de onda ponto de incidência normal) e K_N (curvatura da frente de onda normal). As ondas ponto de incidência normal (NIP – *normal incidence point*) e normal (N) são hipotéticas definidas por Hubral (1983).

Assumindo conhecida a velocidade na proximidade da linha de aquisição, a função tempo de trânsito de empilhamento SRC [1] não depende das velocidades de empilhamento, dependendo apenas do trio de parâmetros SRC, obtidos a partir da seção AN simulada. Assim, com a utilização da função tempo de trânsito de empilhamento SRC [1] e com o trio de parâmetros SRC é calculada a superfície de empilhamento SRC.

Na prática, este trio de parâmetros de empilhamento SRC é determinado a partir dos dados de cobertura múltipla por meio de métodos automáticos de otimização que usam como função-objeto a análise de coerência semblance. Existem dois algoritmos para a determinação destes parâmetros e a simulação de seções AN por este método (Jäger *et al.*, 2001; Garabito, *et al.*, 2001). Neste trabalho será usado o algoritmo de empilhamento SRC desenvolvido por Garabito *et al.*, 2001, cujas particularidades são descritas a seguir.

Considerando um ponto difrator em subsuperfície, ou seja, $K_N = K_{NIP}$, que fisicamente implica que o segmento refletor colapsa num ponto difrator e assim K_N não mais contribui com informações sobre a forma local do refletor em subsuperfície. Aplica-se esta consideração na função [1], obtém-se a função de empilhamento SRC para eventos de difração, dependente de dois parâmetros de empilhamento SRC (β_0 , K_{NIP}), que é dada por

$$t_{D,hip}^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} K_{NIP} [(x_m - x_0)^2 + h^2] \quad [2]$$

A função de empilhamento SRC definido por [2] é uma aproximação local do operador de migração de Kirchhoff.

A outra consideração é $h = 0$, que particulariza a função de empilhamento SRC [1] para o domínio afastamento nulo (AN), logo, aplicando esta consideração, obtém-se

$$t_{AN,hip}^2(x_m, h = 0) = \left[t_0 + \frac{2\text{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} K_N (x_m - x_0)^2 \quad [3]$$

onde esta função depende de dois parâmetros de empilhamento SRC (β_0 , K_N).

Portanto, o problema principal da simulação de uma seção AN pelo método de empilhamento SRC consiste na determinação, a partir dos dados de cobertura múltipla, dos três parâmetros SRC (β_0 , K_{NIP} e K_N) para cada um dos pontos de amostragem da seção AN a ser simulada. Na estratégia seguida por Garabito, *et al.* 2001a, estes parâmetros são determinados em duas etapas por meio da aplicação do método de otimização global *Simulated Annealing*. Numa terceira etapa estes três parâmetros são refinados por meio da aplicação do método de otimização local quasi-Newton, usando como aproximações iniciais os resultados da otimização global. A função objeto usada com ambos métodos de otimização é a medida de coerência do sinal sísmico (*semblance*). Nesse sentido, a determinação do trio de parâmetros SRC independentes pode ser formulado como um problema de maximização (ou minimização) da função *semblance*, avaliada para pontos dentro de um espaço de busca. Os intervalos matemáticos associados a cada parâmetros são: $-\pi/2 < \beta_0 < \pi/2$ e $-\infty < (1/K_{NIP}), (1/K_N) < +\infty$. A seguir, apresenta-se uma breve descrição do algoritmo para determinação dos parâmetros SRC:

ETAPA 1 – Para cada ponto de amostragem P_0 da seção AN a ser simulada, são determinados os parâmetros β_0 , K_{NIP} , por meio do algoritmo *Simulated Annealing* (SA). O *semblance* é realizado ao longo da superfície de empilhamento definida pela função de empilhamento [2].

ETAPA 2 – Também para cada ponto de amostragem P_0 e usando o valor do parâmetro β_0 já conhecido, é determinado K_N através do algoritmo de otimização SA. A busca global é realizada na seção AN resultante da etapa 1, onde o *semblance* é realizado ao longo das trajetórias de empilhamento definidas pela função de empilhamento SRC [3].

ETAPA 3 – Tomando como soluções iniciais os valores dos parâmetros das etapas anteriores, é aplicado o algoritmo de otimização local *quase-Newton* para a determinação dos parâmetros mais ótimos a serem usados para produzir a seção AN SRC final. Nesta etapa, é usada a função de empilhamento SRC [1] para o cálculo da superfície de empilhamento SRC.

Resultado da aplicação do empilhamento SRC nos dados Marmousi

Para analisar e avaliar o desempenho do empilhamento SRC, o algoritmo foi aplicado nos dados Marmousi. Onde este método de empilhamento obteve como resultado a seção sísmica simulada AN SRC (Figura 1). Na Figura 2, mostra-se o resultado da aplicação do empilhamento CMP (NMO/DMO) para comparação.

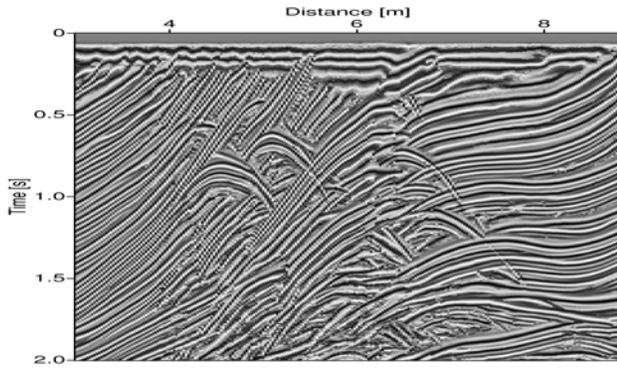


Figura 1: Seção AN simulada pelo método de empilhamento SRC tendo como entrada o dado Marmousi.

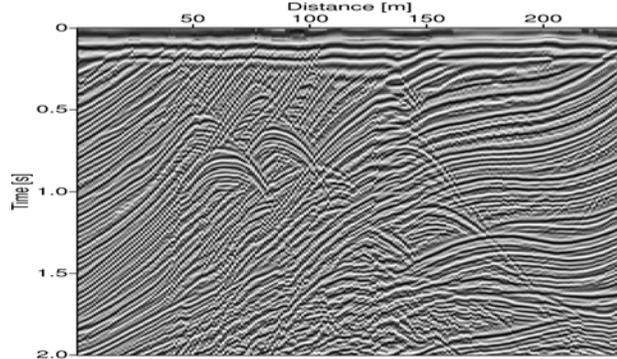


Figura 2: Seção AN simulada pelo método de empilhamento CMP (NMO/DMO) tendo como entrada o dado Marmousi.

Pode-se observar que a seção AN obtida pelo método SRC (Figura 1) tem uma alta razão sinal-ruído, comparado com a seção AN do método CMP (Figura 2). Isto se deve ao fato de que o método SRC envolve grande número de traços sísmicos para simular um dado evento AN. Em geral, na seção AN do método SRC os eventos sísmicos correspondentes a reflexões tem melhor definição, principalmente nos tempos de transito maiores, onde a seção AN do método CMP começa a perder resolução.

Obtenção das velocidades de empilhamento SRC

Outro caso particular importante da função de empilhamento SRC [1], é a para a configuração CMP, onde o ponto médio comum (x_m) desta configuração coincide com o ponto de referência (x_0), isto é, $x_m = x_0$. Logo, aplicando esta condição, a função de empilhamento SRC [1] se reduz a

$$t_{\text{CMP,hip}}^2(x_m = x_0, h) = t_0^2 + \frac{2t_0 K_{\text{NIP}} \cos^2 \beta_0}{v_0} h^2. \quad [4]$$

Observa-se que esta função particular não depende de x_m e tem uma forma hiperbólica semelhante à função de empilhamento CMP (NMO/DMO) (Levin, 1971)

$$t_{\text{CMP}}^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{\text{EMP}}^2}, \quad [5]$$

onde v_{EMP} é a velocidade de empilhamento, que é obtida iterativamente no método de empilhamento CMP (NMO/DMO) a partir da identificação das reflexões primárias nos traços sísmicos da configuração CMP, na

etapa de processamento denominada de *análise de velocidade*. Estas velocidades de empilhamento são utilizadas para correções (NMO/DMO) assumindo o meio composto por camadas homogêneas, planas horizontais e inclinadas.

Por outro lado, relacionando as funções [4] e [5], obtém-se a velocidade de empilhamento (v_{EMP}) em função dos parâmetros de empilhamento SRC, com sendo:

$$v_{\text{EMP}} = \frac{2v_0}{t_0 K_{\text{NIP}} \cos^2 \beta_0}. \quad [6]$$

em que a equação [6] depende dos parâmetros β_0 e K_{NIP} .

A Figura 3a mostra os traços sísmicos da seção CMP localizado na posição 7700m da coordenada ponto médio comum (x_m), dos dados Marmousi. Esta seção também mostra a delimitação na coordenada do afastamento ($2h$) (linha de cor azul) pelo fator de estiramento NMO com um valor máximo de 1.5, sendo esta delimitação introduzida para obter o mapa de coerência (Figura 3b) da seção CMP.

Utilizando a equação [6] e os parâmetros de empilhamento SRC (β_0 , K_{NIP}) estimados durante a simulação da seção AN dos dados Marmousi, são determinadas as velocidades de empilhamento SRC (linha de cor vermelha na Figura 3b). E com a seleção (*picking*) das velocidades realizadas para mesma seção CMP 580, durante a etapa interativa de análise de velocidades do empilhamento CMP (NMO/DMO), foram também obtidas as velocidades de empilhamento (linhas de cor cian na Figura 3b). Esta análise de velocidades foi realizada com um pacote comercial de processamento sísmico. Observa-se que ambas funções de velocidades de empilhamento (SRC e CMP), em grande parte são aproximadas, mostrando apenas grandes diferenças nos lugares onde não se têm eventos sísmicos, que são marcados por grandes picos nas velocidades SRC e baixas coerências.

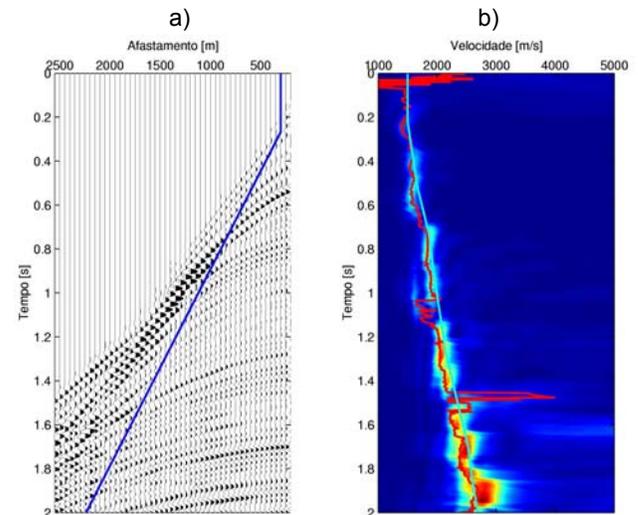


Figura 3: a) Traços sísmicos da seção CMP 580 dos dados Marmousi b) Mapa de coerência da seção CMP 580 e as velocidades de empilhamento SRC (linha de cor vermelha) e CMP (NMO/DMO) (linha de cor cian).

Correção NMO com e sem estiramento do pulso

No empilhamento CMP (NMO/DMO) quando é aplicada a correção NMO nos traços sísmicos de uma seção CMP acontece o efeito de estiramento (alongamento) no período dominante do pulso sísmico (Yilmaz, 1987). A fim de neutralizar este efeito, parte dos sinais sísmicos afetados por este problema são eliminados antes do empilhamento, em uma etapa de processamento chamada de silenciamento (muting).

Definindo matematicamente o fator de estiramento por (Yilmaz, 1987; Barnes, 1992):

$$Est_{NMO} = \left(\frac{dt}{dt_0} \right)^{-1} = \frac{f(t_0)}{f(t)}, \quad [7]$$

onde $f(t_0)$ e $f(t)$ são as freqüências instantâneas antes e depois de aplicada a correção NMO nas seções CMP.

Efetuando a derivação da função de empilhamento CMP (NMO/DMO) [5], obtém-se:

$$Est_{NMO} = \left(\frac{dt}{dt_0} \right)^{-1} = \frac{v_{EMP}^3 t}{v_{EMP}^3 t_0 - 8h^2 \left(\frac{dv_{EMP}}{dt_0} \right)}, \quad [8]$$

onde o resultado da derivação indica que a aplicação da correção NMO no empilhamento CMP (NMO/DMO) altera a freqüência instantânea do pulso de um fator de Est_{NMO} , de tal modo que:

$$f(t_0) = \frac{f(t)}{Est_{NMO}}. \quad [9]$$

Enquanto que, dentro da formulação do empilhamento SRC a aplicação da correção NMO não modifica o período dominante do pulso sísmico, porém, os pulsos sísmicos são distorcidos pelo fato da limitação da função de empilhamento SRC (hiperbólica) para grandes afastamentos ($2h$). Onde esta função hiperbólica descreve tempos de trânsito para raios paraxiais a um dado raio central AN, pois quando os raios paraxiais estão muito afastados do raio central AN a função de empilhamento SRC [1] não é mais precisa, necessitando assim da delimitação na coordenada meio afastamento (h) e também na coordenada ponto médio (x_m).

Antes de demonstrar matematicamente que a correção NMO na formulação do empilhamento SRC não afeta os pulsos sísmicos, é necessário particularizar a função [4] para $\beta_0 = 0$ e $K_{NIP} = 2/(v_0 t_0)$. Estas considerações implicam que as camadas em subsuperfície são homogêneas e com interfaces planas horizontais, onde este modelo é intrínseco da correção NMO.

Aplicando as condições anteriores ($\beta_0 = 0$, $K_{NIP} = 2/(v_0 t_0)$) na função [4] e reescrevendo-a para derivação, tem-se:

$$t = t_0 + \frac{2}{v_0} \left(\sqrt{\frac{1}{K_{NIP}^2} + h^2} - \frac{1}{K_{NIP}} \right). \quad [10]$$

Calculando o fator de estiramento Est_{NMO} para expressão [10], obtém-se:

$$Est_{NMO} = \left(\frac{dt}{dt_0} \right)^{-1} = \frac{f(t_0)}{f(t)} = 1. \quad [11]$$

Isto implica que a freqüência instantânea antes e depois de aplicada a correção NMO na formulação do empilhamento SRC, permanece a mesma, sem alteração, ou seja, $f(t) = f(t_0)$.

Portanto, dentro da formulação do empilhamento SRC, os efeitos de alongamento do pulso sísmico podem ser evitados, ou seja, a freqüência instantânea do pulso antes e depois de aplicada a correção NMO, permanece inalterada. Isto preserva as características do sinal observado até um determinado afastamento ($2h$).

Para ilustração, aplica-se a correção NMO nos traços sísmicos da seção CMP mostrada na Figura (3), dentro das formulações dos empilhamentos SRC e NMO. Observa-se na Figura 4a que o período do pulso sísmico dentro da formulação do empilhamento SRC não distorce quando aplicada à correção NMO, porém, para afastamentos longos os eventos distorcem pelo fato da função empilhamento SRC [1] perder precisão. Enquanto que, a Figura 4b mostra que a simples aplicação da correção NMO na formulação do empilhamento CMP (NMO/DMO) distorce o período do pulso sísmico em qualquer afastamento e para refletores mais rasos.

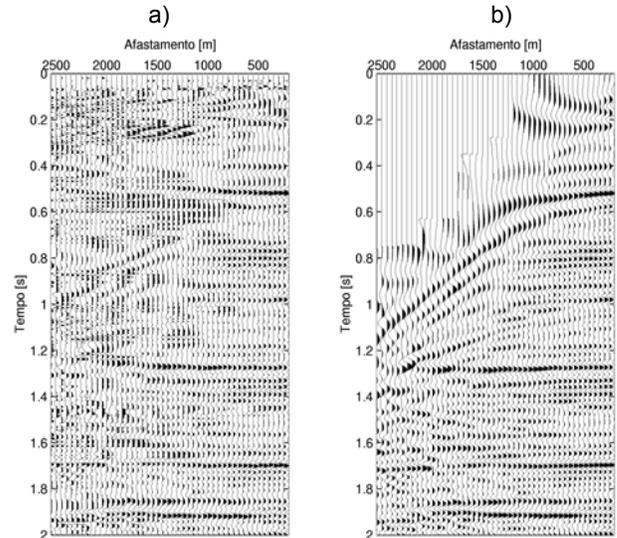


Figura 4: Mostra a correção NMO aplicada a seção CMP dos dados Marmousi, localizado na posição 7700m da coordenada ponto médio comum (x_m). a) correção NMO dentro da formulação do empilhamento SRC e b) correção NMO para a formulação do empilhamento CMP (NMO/DMO).

Conclusões e perspectivas

O resultado da aplicação do empilhamento SRC nos dados Marmousi, em geral, exibe uma razão sinal/ruído superior a do empilhamento CMP (NMO/DMO). Por outro lado, a etapa de correção NMO do empilhamento CMP (NMO/DMO) interativa também pode ser aplicado usando os parâmetros cinemáticos do empilhamento SRC, o que pode abrir a possibilidade de ter uma fase interativa de depuração dos parâmetros do empilhamento SRC determinados automaticamente.

Como trabalhos posteriores, serão realizadas a migração pós-empilhamento no domínio do tempo das seções AN obtidas pelos métodos SRC e CMP (NMO/DMO) e também a migração pós-empilhamento no domínio da profundidade das duas seções AN, usado-se o modelo de velocidades verdadeiro.

Agradecimentos

Agradecemos a ANP pela infra-estrutura fornecida para o curso de pós-graduação em Geofísica da UFPA e pelo apoio financeiro em qualidade de Bolsa de estudo, ao segundo autor, e ao CNPq pelo apoio econômico em qualidade de bolsa de estudo ao terceiro autor.

Referências

- Barnes, A. E., 1992. Another Look at NMO Stretch. *Geophysics*, 57 (5): 749-751.
- Biloti, R., Portugal, R., Santos, T.L., Tygel, M., 2001. Obtaining AVO and AVA curves from CRS attributes. Submitted to **Journal of Geophysical Exploration**.
- Bortfeld, R., 1989. Geometrical ray theory: Rays and traveltimes in seismic systems (secondorder approximations of the traveltimes). *Geophysics*, 54(3):342-349.
- Červený, V., 2001. Seismic ray theory. Cambridge University Press.
- Deregowski, S. M., 1986. What is DNO?. *First Break*, 4(7):7-24.
- Garabito, G.; Cruz, J. C. R.; Hubral, P.; Costa, J. 2001a. Common reflection surface stack by global optimization. Expand. Abstract, 71th Ann. Internat. SEG meeting, San Antonio, Texas, USA.
- Garabito, G.; Cruz, J. C. R.; Hubral, P.; Costa, J. 2001b. Empilhamento sísmico de superfícies de reflexão comum com mergulhos conflitantes. 7º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, Ts2.
- Garabito, G., 2001. Empilhamento sísmico de superfícies de reflexão comum: Um novo algoritmo usando otimização global e local. Tese de doutorado, Universidade Federal do Pará (UFPA).
- Hale, D., 1991. Dip Moveout Processing, vol. 5 of Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists.
- Hubral, P., 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48 (8): 1051-1062.
- Levin, F. K., 1971. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36: 510-516.
- Mayne, W.H., 1962. Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Geophysics*, 27(6): 927-938.
- Müller, T., 1999. The Common-Reflection Surface stack Method – Seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model, Ph.D. thesis, Karlsruhe University.
- Jäger, R.; Mann, J., Höcht, G. and Hubral, P., 2001. Common-reflection-surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66 (1): 97-109.
- Schleicher, J., Tygel, M., and Hubral, P. (1993). Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophys. Prosp.*, 41(4):495-514.
- Tygel, M.; Müller, T.; Hubral, P. and Schleicher, J., 1997. Eigenwave based multiparameter traveltimes expansions. In *Expanded Abstracts*, pages 1770-1773. 67th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.
- Yilmaz, O., 1987. Seismic Data Processing. Tulsa, SEG. 526 p.