



## Processamento de dados GPR registrados na Lagoa do Abaeté pelo método de empilhamento CRS

German Garabito, UFPA, Marco A. Barsottelli Botelho e Tiago Dourado, CPGG/UFBA.

[german@ufpa.br](mailto:german@ufpa.br); [botelho@cpqg.ufba.br](mailto:botelho@cpqg.ufba.br); [tiagodourado@iq.com.br](mailto:tiagodourado@iq.com.br);

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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.

### Abstract

The Common Reflection Surface (CRS) stack method is suite to simulate a zero-offset section with high quality and high signal-to-noise ratio from multi-coverage reflection seismic data. This seismic imaging method is fully automatic and it may be applied to irregular geometry data. We present the first results of the application of the Common Reflection Surface (CRS) method based on global optimization to simulate a zero offset stacked section from multi-coverage Ground Penetrating Radar (GPR) real data. We also present a comparison of the results of the CRS processing with the conventional NMO processing. The results show that the CRS processing provided a zero-offset stacked section with better resolution.

### Introdução

Na sismica de reflexão as técnicas de empilhamento são utilizadas para melhorar a razão sinal-ruído dos dados sísmicos. Mayne (1962) introduziu a técnica denominada Ponto de Reflexão Comum em Profundidade (*Common depth point* - CDP) na aquisição e no processamento de dados. Esta técnica, que revolucionou a sismica de exploração, produz um aumento da razão sinal-ruído por meio da soma construtiva de eventos de reflexões e soma destrutiva de sinal incoerente. Na literatura moderna este método é referido como empilhamento de Ponto Médio Comum (*Common Mid Point* - CMP), devido ao fato de que os dados sísmicos com cobertura múltipla poderem ser organizados em famílias de traços que tem como característica comum terem sido gerados com as fontes e os receptores posicionados de modo equidistante em relação à localização de um ponto no terreno, agora denominado ponto médio comum. Para meios compostos por camadas planas horizontais com velocidades constantes em cada camada, a geometria CMP agrupa os raios que iluminam o mesmo ponto de flexão, em outras palavras agrupa eventos de traços com diferentes afastamentos que trazem informação de um ponto de reflexão comum, assim estes eventos redundantes são somados construtivamente. Portanto, no método de empilhamento CMP deve ser aplicada a correção NMO, usando o macro-modelo de velocidades estimado também nas famílias CMP. Neste método para meios com refletores inclinados deve ser aplicada a correção DMO (*Dip Moveout*) para corrigir o efeito do

mergulho do refletor e problema dos mergulhos conflitantes (Deregowski, 1986).

Recentemente foi introduzido o método denominado Empilhamento por Superfície de Reflexão Comum (*Common Reflection Surface* - CRS) para a simulação de seções com afastamento nulo (AN) a partir dos dados de cobertura múltipla (Muller, 1998; Jäger et al., 2001; Mann, 2001 e Garabito et al., 2001). Este método requer o conhecimento *a priori* de apenas a velocidade próxima a superfície e pode ser aplicado em dados com geometrias irregulares e de meios heterogêneos. Para calcular as curvas de empilhamento que formam a superfície SRC, este método usa a aproximação hiperbólica de tempos de trânsito (Schleicher et al., 1993). Em 2-D esta aproximação depende de três parâmetros ou atributos de frentes de ondas: ângulo de emergência do raio central ( $\beta_0$ ), o raio de curvatura da onda Ponto de Incidência Normal ( $R_{NIP}$ ) e o raio de curvatura da onda Normal ( $R_N$ ). Estes atributos podem ser utilizados para diversas aplicações, como a determinação do modelo de velocidade (Biloti et al., 2002; Duveneck, 2004), análise de amplitudes versus afastamento (Pruessmann, et al., 2004), entre outros.

O método de empilhamento CRS está baseado determinação, a partir dos dados de cobertura múltipla, dos três atributos de frentes de ondas ( $\beta_0, R_{NIP}, R_N$ ), denominados também de parâmetros CRS, associados a cada ponto de amostragem da seção AN a ser simulada. Usando estratégias de busca diferentes para a determinação dos três parâmetros. Atualmente existem duas implementações do método CRS: a primeira utiliza buscas sistemáticas e otimização local (Mann, 2001) e a segunda utiliza otimização global e local (Garabito et al., 2001). Ambas implementações do método CRS foram aplicadas com sucesso em dados sísmicos reais (Mann et al., 1999; Trappe et al., 2001; Garabito et al., 2003). Em Perroud e Tygel (2003) é apresentada uma primeira aplicação em dados reais da primeira implementação do método de empilhamento CRS para determinação da seção empilhada com afastamento nulo e para determinação do modelo de velocidades. Também no referido trabalho, esses resultados foram comparados com seus similares obtidos pelo clássico método de empilhamento CMP.

Neste trabalho apresentamos os resultados preliminares de uma aplicação em dados reais GPR da segunda implementação do método de empilhamento CRS. Para esta aplicação, foram adquiridos dados GPR com cobertura múltipla, na área da Lagoa do Abaeté, Salvador(BA). Nesses dados, também foi aplicado o método de empilhamento CMP usando o pacote comercial FOCUS, isto com o objetivo de comparar as seções com afastamento nulo obtidas por ambos os métodos de empilhamento.

## Empilhamento CRS

A expansão hiperbólica de segunda ordem em serie de Taylor que aproxima os tempos de trânsito dos raios na vizinhança de um raio central fixo, é derivada por meio da teoria paraxial do raio (Schleicher et al., 1993). Para meios 2D, Tygel et al., (1997) derivaram esta aproximação em função dos atributos cinemáticos das ondas hipotéticas: onda do ponto de incidência normal (PIN) e onda normal (N) (Hubral, 1983). Esta formula hiperbólica de aproximação dos tempos de trânsito, é dada por

$$t^2(x_m, h) = \left( t_0 + \frac{2 \sin \beta_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \left( \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right) \quad (1)$$

sendo  $t_0$  o tempo duplo do raio central com de afastamento fonte-receptor nulo e  $v_0$  a velocidade próxima a superfície entorno do ponto de emergência do raio central. As coordenadas  $x_m = (x_G + x_S)/2$  e  $h = (x_G - x_S)/2$  são o ponto médio e o afastamento médio entre a fonte e o receptor, respectivamente, sendo  $x_S$  e  $x_G$  as coordenadas horizontais do par fonte receptor, respectivamente. A coordenada  $X_0 = (x_0, 0)$  sobre a linha sísmica é o ponto de emergência do raio central com fonte-receptor coincidente. Como indicado anteriormente  $\beta_0$  é o ângulo de emergência do raio normal com relação a normal da superfície,  $R_{NIP}$  e  $R_N$  são, respectivamente, os raios de curvaturas da onda PIN e da onda N, ambos medidos no ponto de emergência do raio central.

A expressão (1) depende do conhecimento *a priori* de  $v_0$ , mas pode ser aplicado em meios heterogêneos e em dados com configurações irregulares de fontes e receptores. Portanto, conhecendo-se os valores dos três parâmetros CRS ou atributos cinemáticos de frentes de ondas ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ ) associados a um ponto de amostragem na seção AN a ser simulada  $P_0 = (t_0, x_0)$ , pode-se calcular a superfície de empilhamento associado a esse ponto usando-se a expressão (1). Desta maneira, a simulação de uma seção com afastamento nulo, pelo método de empilhamento CRS, é realizada através da somatória dos eventos sísmicos contidos nas superfícies de empilhamento associadas a cada ponto de amostragem da seção AN a ser simulada.

Para a implementação do método CRS são utilizadas diferentes estratégias de busca dos três parâmetros SRC, que envolvem medidas de coerência dos dados sísmicos realizadas ao longo de curvas de empilhamento. Estas estratégias estão baseadas nas simplificações ou casos particulares da formula (1). A estratégia de busca do método CRS utilizado neste trabalho, consiste de três etapas: 1) busca bidimensional dos parâmetros ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$ ) por meio de otimização global. A formula utilizada para o cálculo das curvas de empilhamento resulta da simplificação de (1) aplicando a condição  $R_{NIP} = R_N$ ; 2) busca unidimensional do parâmetro  $R_N$  por meio de otimização global. As curvas de empilhamento utilizadas nesta etapa são calculadas pela formula que resulta da

simplificação de (1) quando aplicado a condição  $h = 0$ ; 3) nesta ultima etapa é realizado o refinamento dos três parâmetros CRS por meio da aplicação de otimização local. As curvas de empilhamento utilizadas são definidas pela formula (1).

Os métodos de otimização global e local utilizados no método de empilhamento CRS utilizado neste trabalho, cuja estratégia de busca dos parâmetros SRC foi descrito antes, são *Simulated Annealing* e *quase-Newton*, respectivamente. Uma descrição mais detalhada do algoritmo de empilhamento CRS utilizado neste trabalho encontra-se em Garabito, (2001) e Garabito et al., (2003).

## Aquisição e processamento de dados

Sendo o objetivo do presente trabalho o processamento de dados de GPR com cobertura múltipla, de maneira similar ao processamento sísmico clássico usado na industria de exploração de hidrocarbonetos, foi escolhida uma área que proporcionasse boa resposta aos sinais eletromagnéticos do GPR. A área escolhida foi a Lagoa do Abaeté, onde existe uma cobertura arenosa, com nível freático raso e contendo feições geológicas com mergulhos, tais como as paleo frentes de dunas (*foresets*).

O conjunto de dados com cobertura múltipla foi coletado, segundo o arranjo de aquisição WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*), o qual, foi obtido, utilizando um par de antenas (uma transmissora e outra receptora) de 200 MHz do equipamento Mala Geoscience. A aquisição de um radargrama WARR, o qual é o equivalente à familia de fonte comum na sísmica, foi realizada da seguinte maneira: A transmissora é mantida fixa e a receptora é deslocada em linha reta, cerca de 5,0 m, iniciando com um afastamento mínimo de 60 cm entre as antenas até um afastamento máximo de 5,60 m. O intervalo entre cada registro é de 5 cm, obtendo-se assim um radargrama WARR composto por 101 registros ou *scans*. Com este procedimento, foram coletados em total 54 radargramas com transmissor fixo, com um intervalo entre transmissores consecutivos de 20 cm. A janela temporal dos registros é de 0.268 micro-segundos, com um numero de amostras por *scan* de 512 e um intervalo de amostragem de 0.000524 micro-segundos. Na Figura 1 é mostrado um radargrama com transmissor fixo ou WARR.

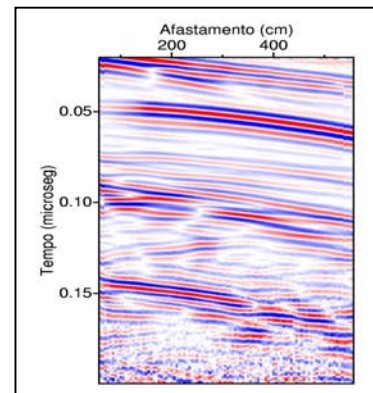


Figura 1. Radargrama WARR com  $t = 0.268$  ms, 512 amostras/scan, 101 scans espaçados de  $Dx = 5$  cm.

Para comparação com as seções empilhadas, na Figura 4 mostra-se o radargrama registrado com afastamento constante (60 cm) obtida ao longo da mesma linha onde foram coletados os dados GPR com cobertura múltipla.

Para a aplicação do método de empilhamento CMP foi utilizado o software comercial FOCUS da *Paradigm Geophysical*. A etapas de processamento CMP aplicadas estão mostradas no fluxograma de Figura 2. Os dados são registrados com arranjo WARR e re-organizados em famílias CMP (*sort*), o que está inserido no módulo "Construção da Geometria", na Fig.02. A seção empilhada com afastamento nulo resultante é mostrada na Figura 4.

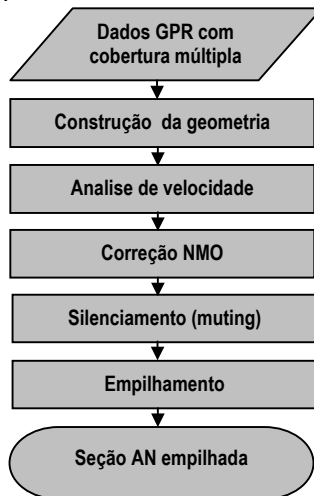


Figura 2 - Fluxograma do método de empilhamento CMP aplicado nos dados GPR registrados na Lagoa do Abaeté.

A aplicação do método de empilhamento SRC nos dados descritos anteriormente foi realizado utilizando o Software 2D-SRC-ZO desenvolvido na UFPA. O fluxograma que resume as etapas de processamento envolvidas por este método é mostrada na Figura 3. Como resultado principal deste método é mostrada a seção AN da Figura 6. No entanto, vale salientar que neste trabalho as seções com os atributos de frentes de ondas e as velocidades de empilhamento não são mostradas.

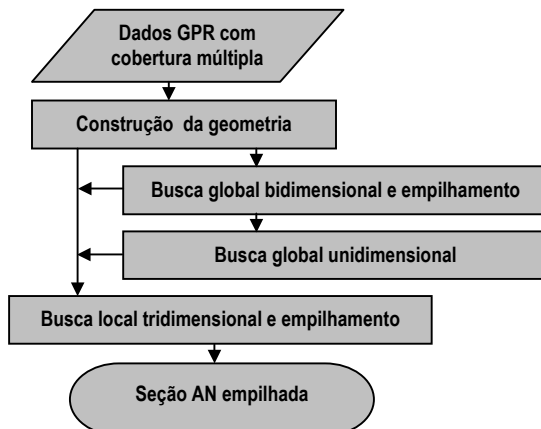


Figura 3. Fluxograma do método de empilhamento CRS aplicado nos dados GPR da Lagoa do Abaete.

## Resultados

No radargrama com afastamento constante (Figura 4) se observa dois eventos de reflexão bem definidos: o primeiro evento é aproximadamente horizontal ( $\sim 0.04$  micro segundos) e o segundo evento mergulhante ( $\sim 0.12 - 0.15$  micro segundos). No pacote compreendido entre estas duas reflexões observam-se alguns eventos de reflexão com amplitudes fortes mas sem continuidade lateral. Também são observados vários outros eventos de reflexão com amplitudes fracas.

O radargrama empilhado resultante do método CMP (Figura 5) tem maior razão sinal ruído e conseqüentemente tem uma melhor definição dos eventos de reflexão. Nesta Figura observam-se quatro refletores fortes com continuidades laterais bem definidas. Entre o terceiro e quarto refletores são observados refletores mergulhantes melhor definidos.

Na Figura 6 mostra-se o radargrama empilhado resultado aplicação do método CRS, que mostra uma alta razão sinal ruído. Neste radargrama os quatro refletores identificados antes se mostram ainda melhor definidos quanto a resolução e continuidade lateral. Entre o terceiro e quarto refletores, observa-se também eventos de reflexão bem definidos. Estes refletores provavelmente estão associados a frentes de dunas, que não são bem definidos na Figura 5 e são dificilmente perceptíveis na Figuras 4.

Os refletores inclinados, com mergulho para a esquerda, acima citados, são *foresets*, ou frentes de dunas progredientes, os quais são encontrados com a mesma atitude em dunas do outro lado da lagoa. O forte refletor que trunca as laminações das frentes de duna, acima descrito como terceiro refletor, parece ser oriundo de uma superfície erosional, tratando-se portanto de uma discordância. A duplicação deste refletor em alguns trechos (entre 600 e 1200 cm) indica uma variação de profundidade e atitude na direção perpendicular ( $y$ ) ao plano de levantamento ( $x,z$ ) do radargrama, o que reforça a interpretação de uma antiga superfície erosiva.

O refletor mais raso, e também o mais forte, a aproximadamente 0.05 ms, é o topo do lençol freático, sua atitude levemente inclinada no radargrama, deve-se à suave variação topográfica na superfície da área onde se registrou os dados de radar.

## Conclusões

Neste trabalho foi mostrado que a aplicação de técnicas de processamento de dados sísmicos de reflexão, seja CMP ou CRS, em dados de GPR, pelo menos nos registrados em ambientes resistivos, produzem imagens ou radargramas com maior resolução. A aplicação viável destas técnicas abre a possibilidade de utilização do GPR em áreas com estruturas geológicas complexas e, principalmente, em áreas com baixa qualidade dos dados GPR.

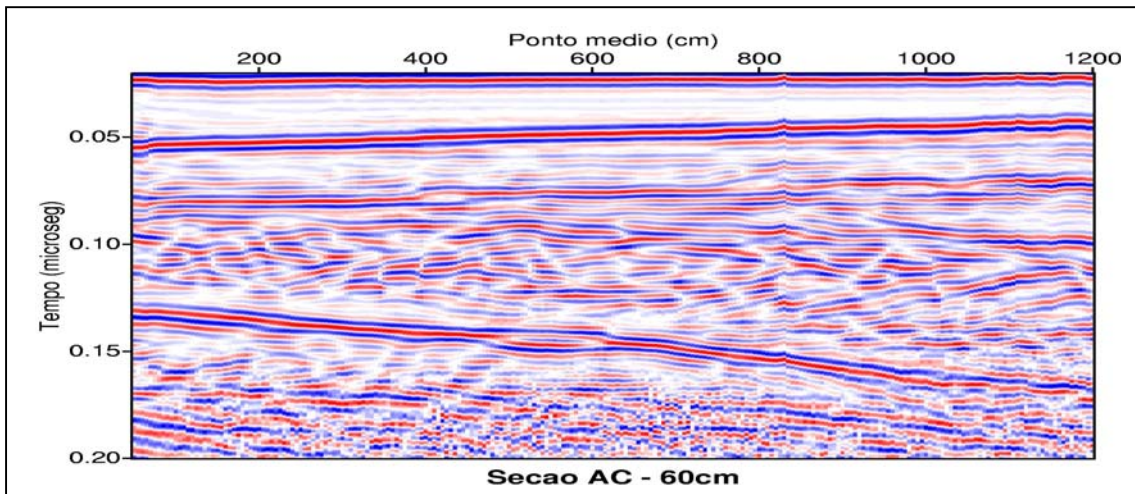


Figura 4. Radargrama com afastamento constante (0,6 m) coletado na mesma linha de aquisição das famílias com transmissor fixo.

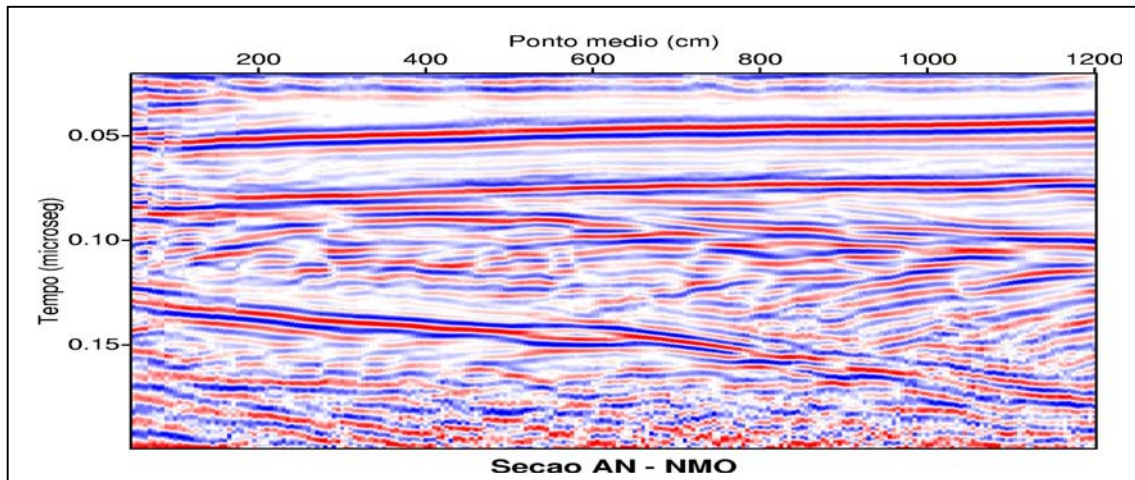


Figura 5. Radargrama empilhado ou com afastamento nulo obtido pelo método de empilhamento CMP.

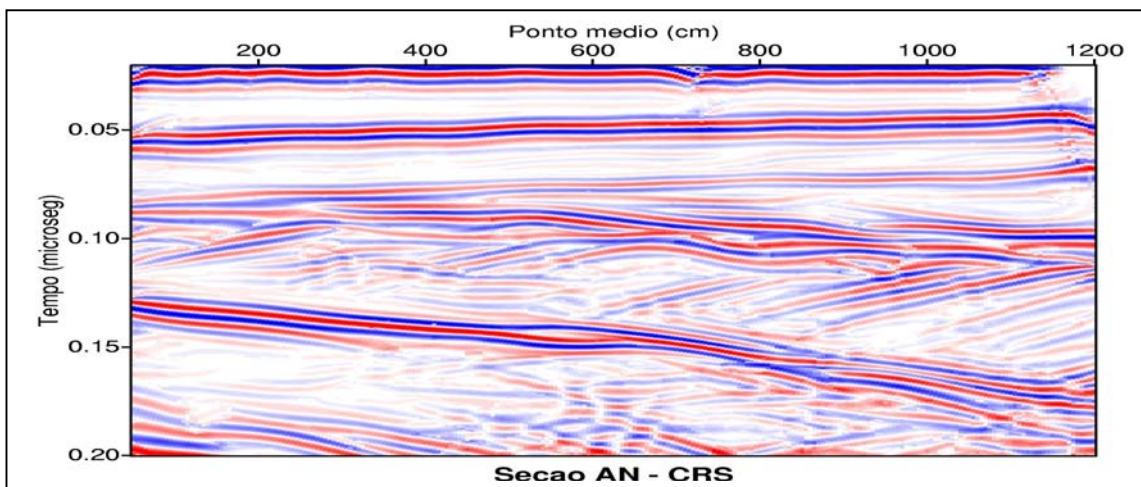


Figura 6. Radargrama empilhado ou com afastamento nulo obtido pelo método de empilhamento SRC.

Com o método CMP foi obtido um radargrama empilhado com melhor resolução dos refletores do que o radargrama com afastamento constante. No entanto, o radargrama empilhado pelo método CRS tem ainda maior resolução quando comparado com o resultado do método CMP. A imagem do empilhamento CRS tem maior razão sinal ruído e apresenta melhor continuidade dos eventos de reflexão.

O método CRS mostrou ser o mais adequado no processamento de dados GPR com cobertura múltipla, constituindo-se portanto em uma alternativa promissora para explorar as diversas aplicações do método SRC e dos atributos CRS em dados GPR.

Um desdobramento natural desta pesquisa é adaptar a técnica CRS para imagear a subsuperfície, onde ondas eletromagnéticas propagam em ambientes mais condutivos. Por exemplo, considerar o papel da condutividade elétrica do meio e da frequência das antenas na velocidade de propagação e na atenuação do pulso eletromagnético.

### Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo apoio a esta pesquisa através do projeto 468048/00-6 e também à ANP por outorgar uma bolsa de mestrado ao terceiro autor deste trabalho.

### Referências

- Bergler, S., Marchetti, P. H. P., Cristini, A., and Cardone, G.,** 2002, 3d common-reflection-surface stack and kinematic wavefield attributes. *The Leading Edge*, 21(10):1010–1015.
- Biloti, R., Santos, L., and Tygel, M.,** 2002, Multiparametric traveltimes inversion. *Studia Geophysica et Geodetica*, 46:177–192.
- Deregowski, S. M.,** 1986, What is DMO? *First Break*, 4(7):7-24
- Duveneck, E.,** 2004, Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes. *Geophysics*, 69:265–274.
- Garabito, G., Cruz, J. C., Eiras, J., and Queiroz, N. P.,** 2003, Application of the crs stack to seismic data of amazon paleozoic basin. *8th. International Congress of Brazilian Geophysical Society, Expanded Abstracts. Rio de Janeiro, Brazil.*
- Garabito, G., Cruz, J. C., Hubral, P., and Costa, J.,** 2001, Common reflection surface stack: A new parameter search strategy by global optimization. *71th. SEG Mtg., Expanded Abstracts. San Antonio, Texas, USA.*
- Hubral P.,** 1983, Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48(8): 1051-1062.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., Hubral, P.,** 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66(1): 97-109
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., Hubral, P.,** 1999, Common-reflection-surface stack – a real data example. *Journal of Applied Geophysics*, 42: 301-318.
- Mann, J.,** 2001, Common-reflection-surface stack and conflicting dips. In: *SEG MEETING, 71., San Antonio, Expanded Abstracts.*
- Mayne, W.H.,** 1962. Common reflection point horizontal data stacking techniques. *Geophysics*, 27(6): 927-938.
- Müller, T.,** 1998, Common reflection surface stack versus nmo/stack and nmo/dmo/stack. *60th Mtg. Eur.Assoc. Expl. Gophys., Extended Abstracts.*
- Perroud, H., and Tygel, M.,** 2003, Velocity estimation by the CRS method: A GPR real data example. *8th. International Congress of Brazilian Geophysical Society, Expanded Abstracts. Rio de Janeiro, Brazil.*
- Pruessmann, J., Coman, R., Enders, H., and Trappe, H.,** 2004, Improved imaging and AVO analysis of a shallow gas reservoir by crs. *The Leading Edge*, 23(9):915–918.
- Schleicher, J., Tygel, M., Hubral, P.,** 1993, Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*, 41(4): 495-514.
- Trappe, H., Gierse, G., and Pruessmann, J.,** 2001, Case studies show potential of common reflection surface stack - structural resolution in the time domain beyond the conventional NMO/DMO stack. *First Break*, 19:625–633.
- Tygel, M., Mueller, T., Hubral, P., Schleicher, J.,** 1997, Eigenwave based multiparameter traveltimes expansions. In: *ANNUAL MEETING OF SEG, 67., Expanded Abstracts, 1770-1773.*