

Amarração Poço-sísmica através da deconvolução sparse-spike: aplicações em campos do mar do Norte

Marcelly X. Borges*, Carlos E. Amanajas & Jose J. S. de Figueiredo, CPGf-UFFA & INCT-GP

Copyright 2023, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2023.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 18th 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

Neste estudo, empregamos a técnica de deconvolução sparse-spike para estimar a wavelet sísmica e recuperar a refletividade. Utilizamos a wavelet estimada em conjunto com o traço sísmico para reconstruir a refletividade nas proximidades do poço. Para avaliar a qualidade da wavelet estimada por meio da deconvolução sparse-spike, realizamos uma amarração poço-sísmica. Além disso, utilizamos marcadores estratigráficos para verificar a qualidade da wavelet estimada e a recuperação da refletividade. Os resultados obtidos demonstraram uma boa precisão na estimativa da wavelet e na recuperação da refletividade em ambos os campos estudados da região do Mar do Norte.

Abstract

In this study, we employed the sparse-spike deconvolution technique to estimate the seismic wavelet and recover the reflectivity. We used the estimated wavelet in conjunction with the seismic trace to reconstruct the reflectivity in the vicinity of the well. To assess the quality of the estimated wavelet through sparse-spike deconvolution, we performed a well-seismic tie. Additionally, we used stratigraphic markers to verify the quality of the estimated wavelet and the recovery of reflectivity. The results obtained demonstrated good accuracy in wavelet estimation and reflectivity recovery in both studied fields in the North Sea region.

Introdução

Uma boa estimativa da wavelet sísmica é fundamental na geofísica de exploração, devido a sua importância na resolução vertical que refere-se à distinção de reflexões do topo e da base de uma camada rochosa [Yilmaz \(1987\)](#). Para a estimativa da wavelet sísmica há alguns métodos de deconvolução que são baseados no modelo convolucional da Terra, assumindo uma wavelet de fase mínima e uma refletividade de processo aleatório. Neste trabalho irei utilizar a deconvolução sparse-spike para estimar a wavelet e recuperar a refletividade ao redor do poço, neste método de deconvolução não é necessário assumirmos uma wavelet de fase mínima e uma refletividade de processo aleatório. A amarração

poço-sísmica é uma etapa importante na interpretação sísmica, ela relaciona medidas do poço (em profundidade) à dados sísmicos (em tempo).

De acordo com [de Macedo and de Figueiredo \(2020\)](#) a deconvolução sparse-spike pode ser vista como um problema de inversão de mínimos quadrados com uma regularização de norma L1. A norma L1 estabelece um sinal mais esparsos quando o seu parâmetro de regularização for diferente de zero, o que será bom para recuperar a refletividade ao redor do poço, entretanto, para a estimativa da wavelet sísmica o parâmetro de regularização terá que ser definido de ordem zero, devido a esparsidade do sinal para parâmetros diferentes de zero. Além dos parâmetros de regularização serem definidos de acordo com a finalidade (estimar a wavelet e recuperar a refletividade), é fundamental também uma matriz convolucional ser calculada [de Macedo and de Figueiredo \(2020\)](#) a partir do modelo convolucional da Terra, para então ser feito a estimativa da wavelet e a recuperação da refletividade. Os resultados obtidos mostraram uma boa performance da deconvolução sparse-spike para a estimativa da wavelet e recuperação da refletividade.

Metodologia

Neste trabalho foi usado os dados de poço do Viking Graben e os dados de poço do campo de Norne. O Viking Graben foi formado no final do rifteamento do Permiano ao Triássico, com uma orientação norte-sul ([Madiba and McMechan, 2003](#)), está localizado no norte da Bacia do Mar do Norte. Para nossa análise utilizamos uma linha sísmica 2D do conjunto de dados Viking Graben, que inclui 2142 pontos médios comuns (CMPs) com dados de 6s a uma taxa de amostragem de 4ms, e um poço, conhecido como poço A (localizado na CMP 808) ao longo da seção sísmica, veja a Figura 1.

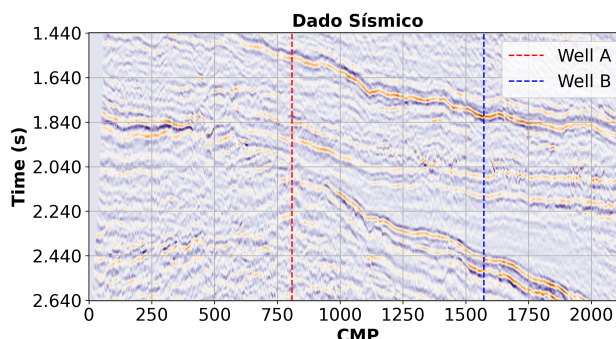


Figura 1: Seção sísmica do poço A e B do Viking Graben.

O campo de Norne está localizado na região do Mar da Noruega, foi formado no Jurássico médio, Norne está localizado na área Nordland II da região do Mar da

Noruega. O campo tem uma área de aproximadamente 9km x 3km que se encontra na transição entre dois elementos estruturais que são o Terraço Dønna e o Nordland Ridge, perto do Complexo de Falhas Revfallet (Cruz, 2015). Para nossa análise utilizamos um dado sísmico 3D que possui uma área de aproximadamente 50 km², com 321 inlines e 1001 crosslines, com dados de 4s a uma taxa de amostragem de 4ms e um poço denominado de 6608/10-4 (poço 4), veja a Figura 2.

Tanto os dados do Viking Graben quanto os dados do campo de Norne foram editados para remoção de ruído e valores nulos. O poço 4 do Campo de Norne possui dados faltantes de velocidade compressional, esses dados foram reconstruídos a partir do modelo de Regressão Linear Simples.

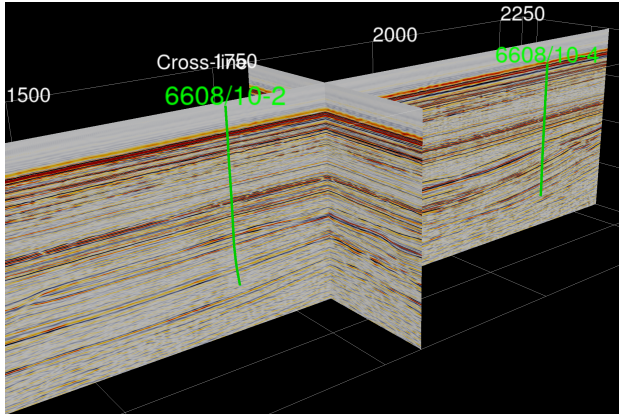


Figura 2: Seção sísmica do poço 2 e 4 do campo de Norne.

A wavelet sísmica será estimada usando a deconvolução sparse-spike, os dados de entrada será a matriz de correlação R e o traço sísmico, e a refletividade será recuperada usando a deconvolução sparse-spike, tendo como entrada a wavelet estimada e o traço sísmico. A partir do modelo convolucional da Terra, um sismograma $s(t)$ é dado a partir da convolução entre uma wavelet sísmica $a(t)$ com uma série de resposta ao impulso $x(t)$ somado a um ruído $n(t)$. Matematicamente temos:

$$s(t) = a(t) * x(t) + n(t). \quad (1)$$

A Equação 1 é dada na forma matricial de acordo com de Macedo and de Figueiredo (2020):

$$Ax = s, \quad (2)$$

no qual x e s são vetores e A é a matriz convolucional, e o ruído é omitido. Após uma série de manipulações mais detalhadas em de Macedo and de Figueiredo (2020) na forma matricial, podemos estimar a wavelet a partir da Equação 3 e recuperar a refletividade a partir de:

$$x = (R + \beta I)^{-1} g, \quad (3)$$

no qual x é a estimativa da wavelet, R é uma matriz de autocorrelação, β é o parâmetro de regularização quadrática de ordem zero e I é uma matriz identidade para o parâmetro de regularização quadrática de ordem zero. Matematicamente temos:

$$x = (R + \alpha Q)^{-1} g, \quad (4)$$

no qual x é a recuperação da refletividade, R é uma matriz de autocorrelação, α é o parâmetro de regularização da norma L1 para controlar a esparsidade e Q é uma matriz de elementos para a regularização da norma L1.

Para isso, primeiro é necessário editar o perfil de densidade e o perfil sônico (como sugerido em White and Simm (2003) e Simm et al. (2014)), para a remoção de ruído e valores nulos, feito isso, gerar a série de refletividade em profundidade, de acordo com

$$R_i = \frac{\rho_{i+1}v_{i+1} - \rho_i v_i}{\rho_{i+1}v_{i+1} + \rho_i v_i}, \quad (5)$$

no qual R é a série de refletividade, ρ é a densidade e v é a velocidade. Após gerar a série de refletividade em profundidade, é estabelecido uma relação tempo-profundidade para converter a refletividade em que está em profundidade para tempo. Com a conversão, a refletividade $R(t)$ será convolvida com a wavelet estimada $W(t)$ pela deconvolução no tempo para gerar um traço sísmico sintético $S(t)$, veja a Equação 6 e por fim ser comparado com o traço sísmico real a partir do coeficiente de correlação é dado por:

$$S(t) = R(t) * W(t). \quad (6)$$

Para a realização deste trabalho usamos como entrada dados sísmicos e dados de poço. Editamos os dados de poço, geramos uma série de refletividade em profundidade, aplicamos uma relação tempo-profundidade para converter a refletividade em tempo. Com a refletividade em tempo e o traço sísmico, realizamos a deconvolução no tempo para estimar a wavelet sísmica, após a estimativa da wavelet, realizamos o processo de recuperação da refletividade. A refletividade será recuperada a partir da deconvolução sparse-spike entra a wavelet estimada e o traço sísmico, com essa deconvolução será obtido também o traço sísmico sintético, a Figura 3 nos mostra em fluxograma o processo deste trabalho, com o traço sísmico sintético estabelecido é possível compará-lo com o traço sísmico real.

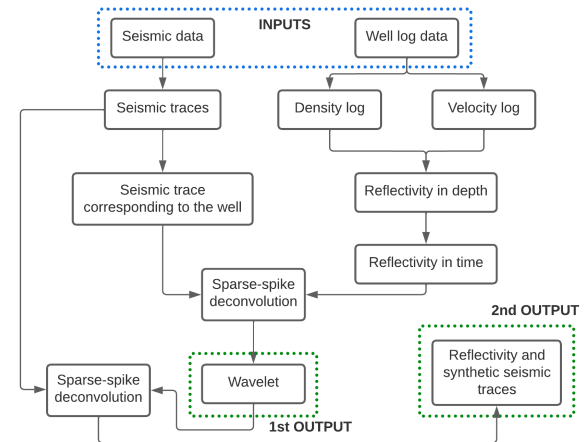


Figura 3: Fluxograma do processo de estimativa da wavelet e recuperação da refletividade.

Resultados e Discussões

As Figuras 4 e 5 mostram os perfis de densidade, velocidade compressional e o de refletividade em profundidade para ambos os poços, onde a refletividade foi calculada a partir dos perfis de densidade e velocidade compressional, para o poço A do Viking Graben e para poço 4 do Campo de Norne.

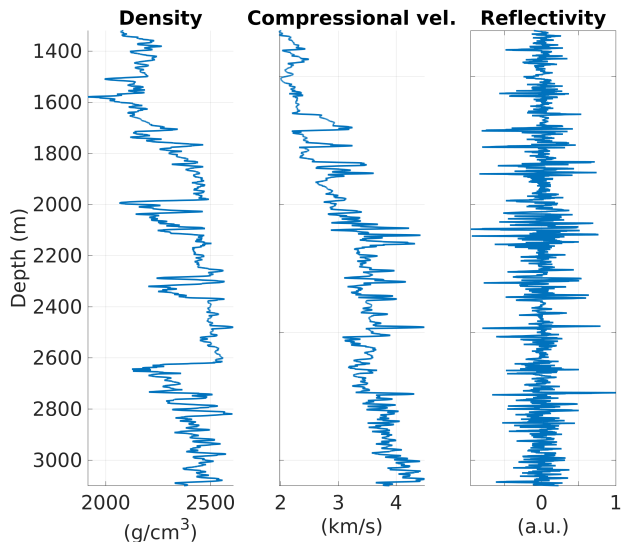


Figura 4: Perfis de densidade, velocidade compressional e refletividade do poço A do Viking Graben.

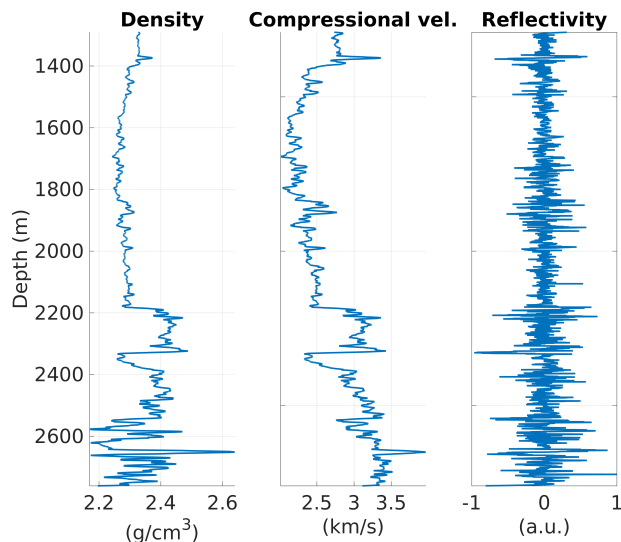


Figura 5: Perfis de densidade, velocidade compressional e refletividade do poço 4 do Campo de Norne.

A partir dos dados de VSP (Vertical Seismic Profile) do poço A e dos dados de checkshot do poço 4, foi possível aplicar a relação tempo-profundidade e obter a refletividade em tempo para ambos os poços. Estimamos a wavelet por meio da deconvolução sparse-spike e convoluamos com a refletividade no tempo, tendo como resultado o traço sísmico sintético. Posteriormente esse traço sísmico sintético é comparado com o traço sísmico real, veja as Figuras 6 e 7 a partir do coeficiente de correlação de Pearson. Este processo é feito para ambos os poços. Obtivemos uma correlação de 0.86 para o poço A e 0.93 para o poço 4, o que significa uma eficácia na

deconvolução sparse-spike.

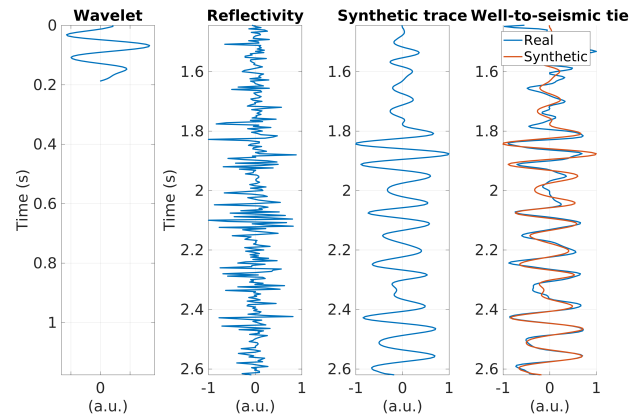


Figura 6: Wavelet estimada, refletividade em tempo, traço sísmico sintético e amarração poço-sísmica do poço A do Viking Graben.

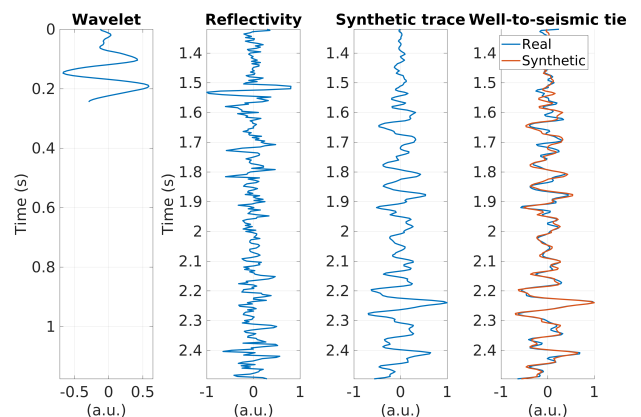


Figura 7: Wavelet estimada, refletividade em tempo, traço sísmico sintético e amarração poço-sísmica do poço 4 do Campo de Norne.

Com a wavelet sísmica estimada foi possível recuperar a refletividade a partir da deconvolução sparse-spike para alguns traços sísmicos na vizinhança do poço e traçar marcadores estratigráficos entre a refletividade recuperada, perfil de raio Gama e densidade, para identificação de horizontes estratigráficos, veja as Figuras 8 e 9, onde esses marcadores estratigráficos foram retirados a partir das informações geológicas disponíveis para ambos os poços.

A utilização de dois campos serve para compararmos de forma eficaz a performance da deconvolução sparse-spike, onde essa deconvolução estima a wavelet através da minimização de mínimos quadrados com regularização quadrática de ordem zero e requer a escolha de um regularizador que ajude na produção de uma solução mais estável. A escolha do regularizador pode ser auxiliada pela amarração poço-sísmica, pois diferentes valores para o regularizador vão gerar diferentes wavelets. O valor escolhido para o regularizador foi de 0, temos 3 iterações para a estimativa do poço A e 3 iterações para o poço 4. Para a recuperação da refletividade, o parâmetro de regularização aumenta a dispersão da solução à medida que seu valor também aumenta.

Valores muito baixos geram refletividades muito ruidosas e valores altos demais camuflaram determinadas feições geológicas existentes. Para o poço A usamos um regularizador 0,1 e 0,7 para o poço 4.

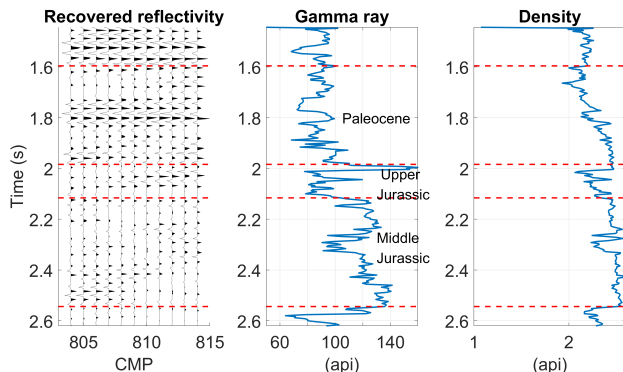


Figura 8: Demonstração de marcadores estratigráficos na refletividade recuperada, perfil de raio Gama e densidade, para identificação de horizontes estratigráficos do poço A do Viking Graben.

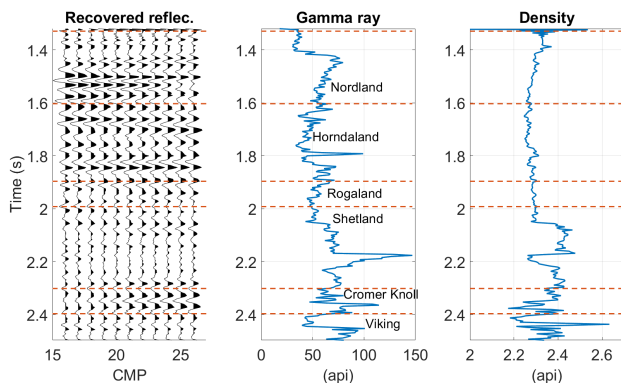


Figura 9: Demonstração de marcadores estratigráficos na refletividade recuperada, perfil de raio Gama e densidade, para identificação de horizontes estratigráfico do poço 4 do Campo de Norne.

Nas Figuras 10 e 11 temos os traços sísmicos gerados a partir da estimativa da wavelet sísmica e da refletividade recuperada. Podemos observar que obtivemos uma boa wavelet e uma boa recuperação da refletividade, pois quando traçado o traço sintético na seção sísmica, as amplitudes dos traços são correspondentes na seção sísmica. A amarração poço-sísmica serve como uma forma de verificar quantitativamente se a estimativa da wavelet feita pela deconvolução sparse-spike é boa ou não. Uma boa estimativa da wavelet pode ser usada para a recuperação da refletividade nas proximidades do poço. Assim realizamos a recuperação da refletividade de vários traços próximos ao poço, usando a wavelet estimada em apenas um traço correspondente ao poço. De posse da refletividade podemos proceder a identificação de horizontes estratigráficos na seção sísmica. A refletividade permite uma segunda amarração poço-sísmica, com os traços sintéticos gerados da convolução entre a refletividade recuperada e a wavelet estimada. Fizemos uma média das correlações obtidas para a amarração dos

traços nas proximidades do poço e obtivemos 0.90 para o poço A e 0.91 para o poço 4.

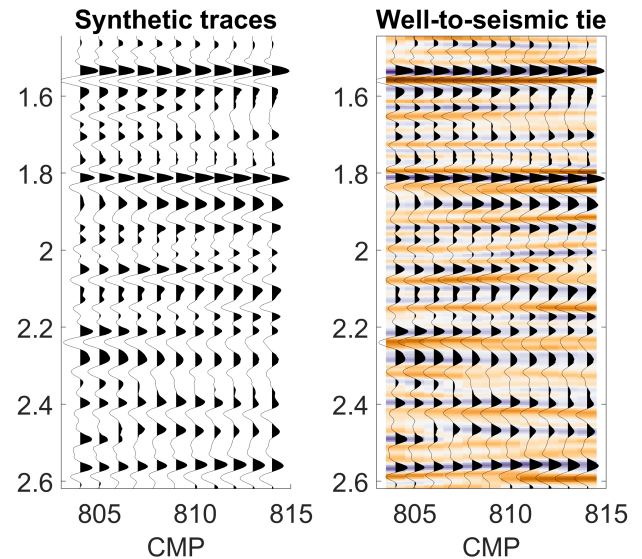


Figura 10: Traço sintético na seção sísmica do poço A do Viking Graben.

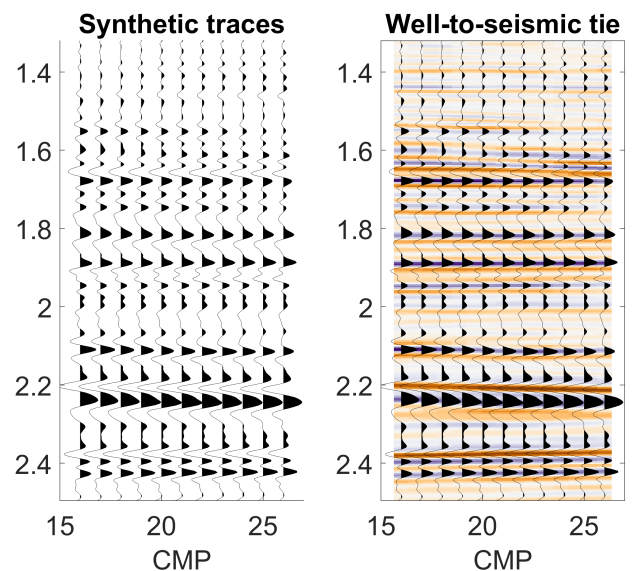


Figura 11: Traço sintético na seção sísmica do poço 4 do Campo de Norne.

A deconvolução sparse-spike para a recuperação da refletividade tem suas limitações quando os alvos são mais suaves. Para o campo do Viking Graben, a recuperação da refletividade se mostrou mais suave, recuperando alguns marcadores estratigráficos e outros não. Para o campo de Norne, a refletividade recuperada possui muito mais detalhes, recuperando não só os marcadores quanto outras feições geológicas. Uma causa para essa característica pode se dar pelo fato da região de Norne ser muito mais homogênea gerando pouca atenuação do dado sísmico, gerando assim uma seção sísmica com uma qualidade maior do que a do Viking Graben.

É de suma importância informações geológicas

para verificar possíveis erros de deslocamento nas refletividades. Marcadores estratigráficos são de suma importância para termos não só um controle quantitativo da recuperação quanto qualitativo da mesma. Utilizamos marcadores estratigráficos em ambos os campos para verificar a qualidade da recuperação da refletividade e da estimativa da wavelet.

Conclusão

Propomos aqui uma análise da utilização da deconvolução sparse-spike para a estimativa da wavelet sísmica e recuperação da refletividade em dois campos distintos e verificamos sua eficácia por meio da amarração poço-sísmica. A wavelet estimada é usada como entrada para uma segunda deconvolução para recuperar a refletividade, tentamos com isso mostrar que a refletividade recuperada mostra bem a posição dos marcadores estratigráficos de cada campo.

A metodologia de estimativa da wavelet possui uma performance robusta em comparação à wavelet original, pois utiliza tanto dados sísmicos quanto dados de poço para realizar a estimativa. Além disso, ela não faz suposições sobre a wavelet ser de fase mínima ou a refletividade ser um processo aleatório, embora considere a wavelet como sendo estacionária. Ambas as estimativas da wavelet tiveram um bom desempenho para ambos os campos, apresentando valores satisfatórios de correlação. A recuperação da refletividade capturou com mais detalhes as características do campo de Norne, levando em consideração os marcadores estratigráficos usados como referência para avaliar quantitativamente a qualidade da recuperação da refletividade. Trabalhos futuros explorarão metodologias de aprendizado de máquina para estimar as wavelets sísmicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará (UFPA), ao INCT-GP e a Faculdade de Geofísica pelo apoio institucional. A discente Marcelly Xavier agradece ao PET pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

Referências

- Cruz, D. C., 2015, 3d geological model of the garn and not formations in norne field, mid-offshore norway: PhD thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - NTNU.
- de Macedo, I. A., and J. J. S. de Figueiredo, 2020, On the seismic wavelet estimative and reflectivity recovering based on linear inversion: Well-to-seismic tie on a real data set from viking graben, north sea: *Geophysics*, **85**, D157–D165.
- Madiba, G. B., and G. A. McMechan, 2003, Processing, inversion, and interpretation of a 2d seismic data set from the north viking graben, north sea: *Geophysics*, **68**, 837–848.
- Simm, R., M. Bacon, and M. Bacon, 2014, *Seismic amplitude: An interpreter's handbook*: Cambridge university press.
- White, R., and R. Simm, 2003, Tutorial: Good practice in well ties: *First Break*, **21**, 75–83.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: Investigation in geophysics, **2**, 526.