



Análise comparativa entre as wavelets Ricker e Extraída para amarração de poços

André A Acquaviva (Petrobras), Ricardo Nicácio (Halliburton), Edson Silva (Infotec) e Bernardo Portugal (Halliburton)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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.

Abstract

Nowadays, the usage of the Ricker wavelet is often in the processes of synthetic generation, since it presents results relatively satisfactory. Additionally, there are other types of theoretical, as well as extracted wavelets. The extraction process, in this work, uses the Fast Fourier Transform (FFT), which requires a more complex workflow. The application of this wavelet for each geological context, can impact positively the quality of the generated synthetic, which can be extracted from the own seismic data. The increasing the quality can produce better frequency, phase and wavelength results, bringing a higher confidence in synthetic generation and accuracy in the seismic-well tie. This work uses boreholes coming from the same area in order to generate synthetic seismograms. For each of them, two synthetic are obtained: one from Ricker and the other one from the FFT extraction. Both seismograms are compared quantitatively, by the cross-correlation method, and qualitatively, by direct interpretation. For both comparative methods, the Extraction method presented better results than the Ricker, in relation to the wells used for this paper.

Introdução

Existem muitas variáveis para uma boa amarração poço-sísmica. Este artigo trata sobre uma das mais importantes, a escolha da wavelet para a criação de um sismograma sintético.

Atualmente a Ricker é a mais utilizada wavelet fase zero para a criação de um sintético. Ela se baseia em um modelo matemático que realiza uma combinação linear de wavelets para simular um pulso padrão. Esse modelo leva em consideração a fase e a frequência pré-determinadas para simular o pulso.

As wavelets Extraídas são resultantes de modelos matemáticos desenvolvidos pelas empresas de software de interpretação sísmica, que usam informações diretamente do traço sísmico para simular o pulso sísmico. Como os dados vêm diretamente do traço sísmico, podemos dizer que esse processo leva em consideração informações intrínsecas da geologia

expostas ao longo da trajetória do poço. Com isso, espera-se um resultado ainda melhor na criação do sintético.

Dentro das Extraídas há formas diferentes de tratamentos matemáticos, entre modelos estatísticos e determinísticos. Este trabalho é baseado em um determinístico que usa a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

O trabalho foi realizado em três poços da Bacia de Santos na costa brasileira. Um dos poços atravessa uma camada de sal de aproximadamente 1.000 metros de espessura, dessa forma o sintético representará uma parte do sal e outra do pré-sal. Este cenário geológico foi escolhido propositalmente e se torna importante para a análise das wavelets aqui descritas, pois estes dois domínios possuem conteúdos de frequências bem diferentes entre si. A importância desse caso vem da limitação da Ricker em escolher uma única frequência dominante. A Extraída, por outro lado, busca informações específicas para as duas áreas.

Com tudo isso, as perguntas que pairam são: A extraída é a melhor escolha para criação de um sismograma sintético? A extraída tem alguma desvantagem?

Para conseguir essas respostas, usamos dois modelos para comparar a Extraída com a Ricker, o quantitativo e o qualitativo. O primeiro se baseia em valores de correlação cruzada. Já o segundo, tem como fundamento a qualidade do sintético comparado com a sísmica, buscando eventos da sísmica no sintético.

Método

Foram utilizados três poços de áreas diferentes dentro da Bacia de Santos. Para cada poço foi gerado dois sismogramas sintéticos, um baseado na Ricker e outro na Extraída. Todo o processo foi realizado no *Well Seismic Fusion (Versão 5000.8.3.1)* da Halliburton.

Nos dois casos não houve qualquer tipo de *stretch* e *squeeze*. Foi realizado somente o encaixe do sintético na sísmica, e com isso o cálculo da correlação cruzada e a análise qualitativa. Resumindo, o único parâmetro alterado foi a forma da wavelet: Ricker ou Extraída.

Para a Ricker foi utilizada como frequência dominante a que o software indicava como a que fornecia o maior valor de correlação cruzada.

A escolha para o tamanho do sintético se baseou no trecho onde o poço possuía perfis Sônicos e de Densidade.

Ricker

Segundo Ricker (1945) o pulso Ricker é simétrico e definido pela seguinte função:

$$w(t) = \left\{ 1 - \left(\frac{4t}{T} \right)^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{4t}{T} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

O t representa o tempo, T o intervalo de tempo entre os dois picos negativos.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Gonçalves (2004) mostra que através da FFT é possível realizar a transição entre as variáveis de tempo em frequência com um menor custo computacional, ou seja, o tempo de processamento é menor se comparado a uma Transformada Discreta de Fourier (DTF). Segundo Duarte (2007) esse é um método rápido para o cálculo da DFT que é baseado na decomposição da função de entrada em dipolos. Dada uma função discreta x_j com N coeficientes, a DTF convencional pode ser calculada através da equação:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j \exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N} \right) \quad (2)$$

A equação acima requer N^2 exponenciais. É importante ressaltar que praticamente todo tempo de processamento computacional é gasto com exponenciais. O algoritmo da FFT opera significativamente na redução do tempo de processamento.

Para uma função de entrada ser um dipolo, as quatro exponenciais dadas pela DFT serão reduzidas aos valores 1, 1, 1, -1, conforme abaixo:

$$\exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N} \right) = \begin{cases} 1 & \text{para } (k=0), (j=0) \\ 1 & \text{para } (k=0), (j=1) \\ 1 & \text{para } (k=1), (j=0) \\ -1 & \text{para } (k=1), (j=1) \end{cases} \quad (3)$$

A DTF de um dipolo $a_j = (a_0, a_1)$ pode ser calculada como:

$$A_0 = (a_0 + a_1)/2 \quad (4)$$

$$A_1 = (a_0 - a_1)/2 \quad (5)$$

Da mesma forma:

$$a_0 = A_0 + A_1 \quad (6)$$

$$a_1 = A_0 - A_1 \quad (7)$$

A rapidez da FFT pode ser observada a partir das quatro equações a seguir:

$$Y_k = \frac{1}{N/2} \sum_{j=0}^{N/2-1} y_j \exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N/2} \right) \quad (8)$$

$$Z_k = \frac{1}{N/2} \sum_{j=0}^{N/2-1} z_j \exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N/2} \right) \quad (9)$$

$$X_k = \frac{1}{2} \left[Y_k + \exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N} \right) Z_k \right] \quad (10)$$

$$X_{(k+n/2)} = \frac{1}{2} \left[Y_k + \exp \left(-i \frac{2\pi k j}{N} \right) Z_k \right] \quad (11)$$

Onde $k=0,1,\dots,N/2-1$. Estas equações informam que se N for par a DTF de x_j pode ser calculada mais rapidamente, computando-se as DFTs correspondentes às sequências par e ímpar de x_j , as quais são combinadas para gerar a DTF de x_j . As DTFs parciais são calculadas com (6) e (7), requerendo um total de $2(N/2)^2$ exponenciais. A combinação feita com (8) e (9) requer N^2 exponenciais. O processo envolve, portanto, um total de $2(N/2)^2 + N$ exponenciais. Para valores elevados de N , este esquema proporciona uma economia da ordem de 50% no tempo de processamento de máquina.

É importante observar que as exponenciais só são calculadas na fase de combinação das DFTs. Cada etapa precisa de N exponenciais e o número total de etapas são $n-1$, as quais pode-se concluir que o número total de exponenciais é:

$$N(n-1) = N \left[\frac{\text{Log} N}{\text{Log} 2} - 1 \right] \quad (12)$$

A divisão de N^2 pelo valor obtido em (10) é uma boa estimativa da eficiência da FFT em relação a DFT.

Correlação Cruzada

Duarte (2007) define a correlação entre as funções $a(t)$ e $b(t)$ é definida como:

$$\phi_{ab} = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) b^*(t-u) dt \quad (13)$$

O u representa o deslocamento e b^* o complexo conjugado de $b(t)$. A correlação cruzada para $b(t)$ real é escrita como:

$$\phi_{ab} = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) b(t-u) dt \quad (14)$$

Analisando no domínio discreto tem-se que:

$$\phi_{ab} = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} a_t b_{t-u} = \sum_{t=-\infty}^{+\infty} a_{t+u} b_t \quad (15)$$

A equação (14) é equivalente à convolução da primeira função com a segunda função revertida:

$$\phi_{ab} = a(t) * b(-t) \quad (16)$$

Podemos exemplificar um cálculo de correlação entre (4,3,2) com (2,1) como se fosse a convolução de (5,4,3) com (1,2). Após o cálculo de convolução temos que:

$$\phi_{ab}(u) = (4,11,8,4) \quad (17)$$

É observado que o valor 11 nesse cálculo recebe o nome de *lag zero*. Isso ocorre devido à reversão da segunda função (2,1) e com isso o resultado tem sempre uma parte anticausal. O tempo da última amostra da segunda função equivale ao tempo da primeira amostra e isso afeta o sinal negativo. Importante ressaltar que a correlação cruzada não é cumulativa, ou seja:

$$\phi_{ab} \neq \phi_{ba}^* \quad (18)$$

Resultados

Toda a teoria do trabalho foi aplicada em três poços da Bacia de Santos, chamados de poço A, poço B e poço C. Em todos os três casos, as wavelets são tratadas com fase zero, tanto a Extraída quanto a Ricker.

Os resultados estão organizados em três figuras para cada poço. A primeira figura apresenta gráficos de três espectros, do lado direito e acima temos o espectro de amplitude, logo abaixo a fase da wavelet, já à esquerda temos a forma da wavelet. Nas três figuras a Ricker e a Extraída são diferenciadas pela cor. A segunda figura ilustra os resultados da análise quantitativa, mostrando o resultado da correlação cruzada e o envelope. E a terceira figura representa o resultado qualitativo dos poços.

Para o poço A foi utilizada a janela de 3.850 ms até 4.900 ms. Para a Ricker, escolhemos como frequência dominante 24Hz.

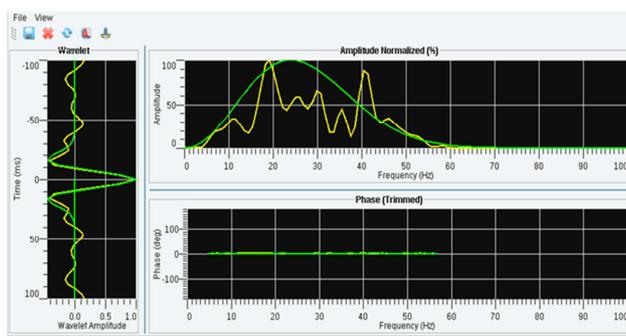


Figura 1 – Formas das wavelets, espectros de amplitude e fase das wavelets para o poço A. Linhas amarelas representam a Extraída enquanto as verdes a Ricker.

Os resultados para o poço A foram:

- O que mais chama a atenção na Figura 1 é a presença de dois picos no espectro de frequência, o primeiro na região de 19 Hz e o segundo na região de 41 Hz. Isso pode ser explicado pelo fato do poço atravessar tanto o sal quanto o pré-sal, duas regiões que apresentam respostas de frequências distintas.

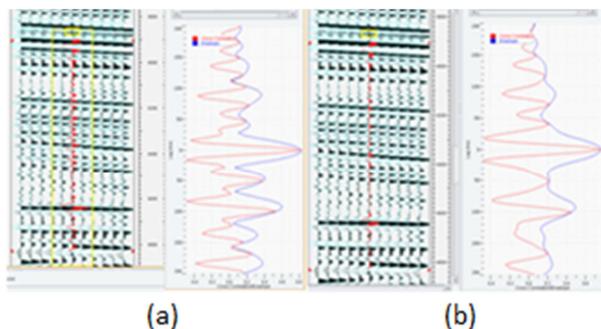


Figura 2 – Análise quantitativa, Envelope e Correlação Cruzada, da Extraída (a) e da Ricker (b) para o poço A.

- Já a Figura 2 nos retorna como resultado quantitativo, uma correlação cruzada de 0,82 para a Extraída e de 0,77 para a Ricker. A influência do segundo pico da Figura 1 já é notada tanto no envelope quanto na correlação cruzada da Extraída.

- Na Figura 3 fica nítida a importância do segundo pico da Figura 1. Nas regiões de mais alta frequência, o sintético criado a partir da Ricker mascara alguns eventos presentes na sísmica e que ficam claro no sintético da Extraída, como as setas laranjas apontam. Essa resposta apresentada para a Extraída facilita e muito o processo de amarração do poço, pois alguns eventos geológicos, antes minimizados pela aplicação da Ricker, agora são amplificados pelo uso da Extraída.

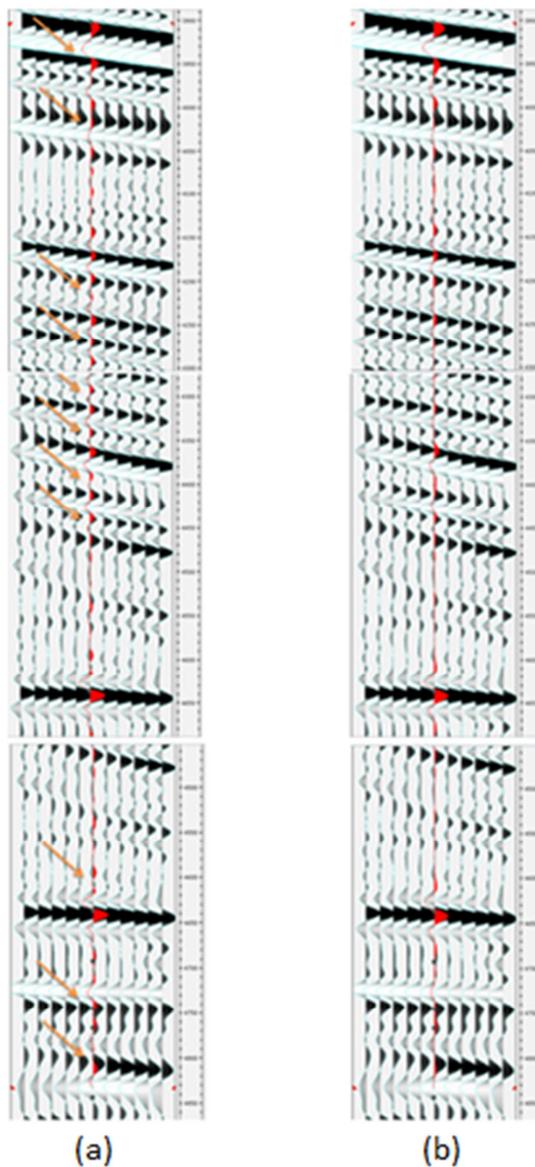


Figura 3 - Análise qualitativa, Sintético sobre a Sísmica, da Extraída (a) e da Ricker (b) para o poço A.

Para o poço B foi utilizada a janela de 2.827 ms até 3.270 ms. Nesse caso, a frequência dominante da Ricker foi de 18 Hz.

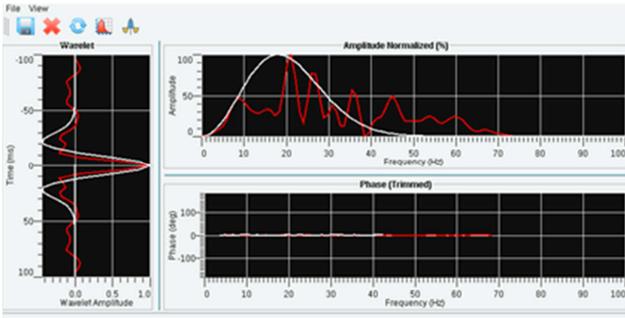


Figura 4 - Formas das wavelets, espectros de amplitude e fase das wavelets para o poço B. Linhas vermelhas representam a Extraída enquanto as brancas a Ricker.

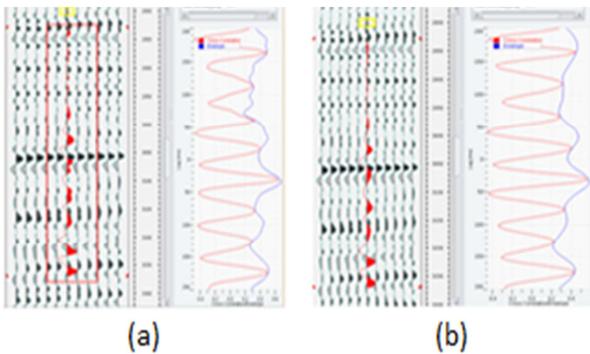


Figura 5 - Análise quantitativa, Envelope e Correlação Cruzada, da Extraída (a) e da Ricker (b) para o poço B.

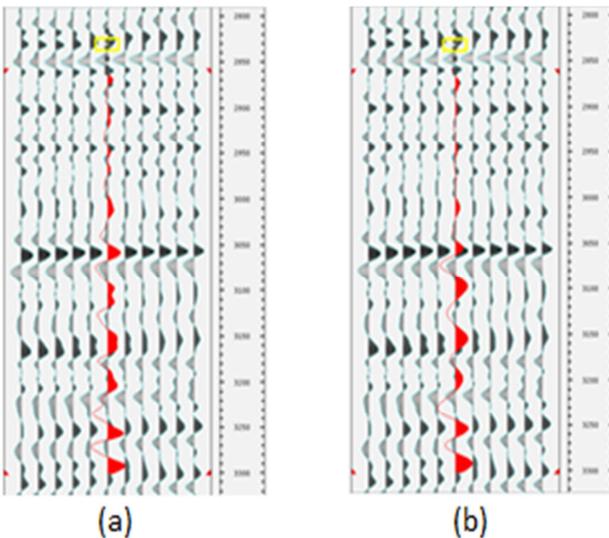


Figura 6 - Análise qualitativa, Sintético sobre a Sísmica, da Extraída (a) e da Ricker (b) para o poço B.

Para o poço B, tem-se os seguintes resultados:

- Mais uma vez, no espectro de frequência, agora da Figura 4, tem-se a Extraída com valores para frequências maiores que o da Ricker.

- A Figura 5 apresenta como resultados quantitativos uma correlação cruzada de 0,68 para a Extraída e 0,58 para a Ricker. Mais uma vez, as frequências altas ficam claras no envelope.

- A parte qualitativa, representada pela Figura 6, novamente as frequências mais altas que vemos no espectro da Extraída nos dá um sintético que representa alguns eventos da sísmica que o sintético baseado na Ricker não vê.

Já para o poço C, foi aplicada uma Ricker de 15Hz como frequência dominante, para uma janela de 3.088 ms até 3.468 ms.

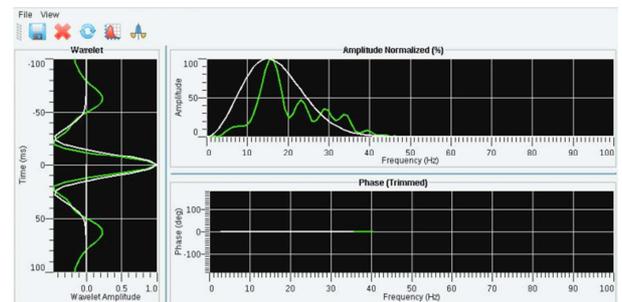


Figura 7 - Formas da wavelets, espectros de amplitude e fase das wavelets para o poço C. Linhas verdes representam a Extraída enquanto as brancas a Ricker.

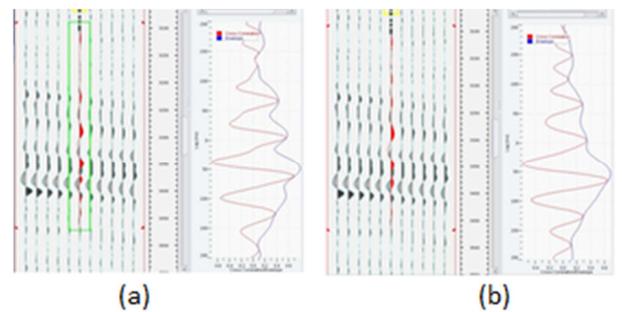


Figura 8 - Análise Quantitativa, Envelope e Correlação Cruzada, da Extraída(a) e da Ricker (b) para o poço C.

O poço C retornou os seguintes resultados:

- No espectro não houve tanta diferença
 - A resposta quantitativa, presente na Figura 8, foi uma correlação cruzada de 0,80 para a Extraída e 0,69 para a Ricker.

- A parte qualitativa do resultado apresentado na Figura 9, fica clara a diferença na parte mais profunda do sintético, onde na Extraída os eventos da sísmica estão bem marcados, já na mesma região para a Ricker, temos apenas um evento para vários eventos na sísmica.

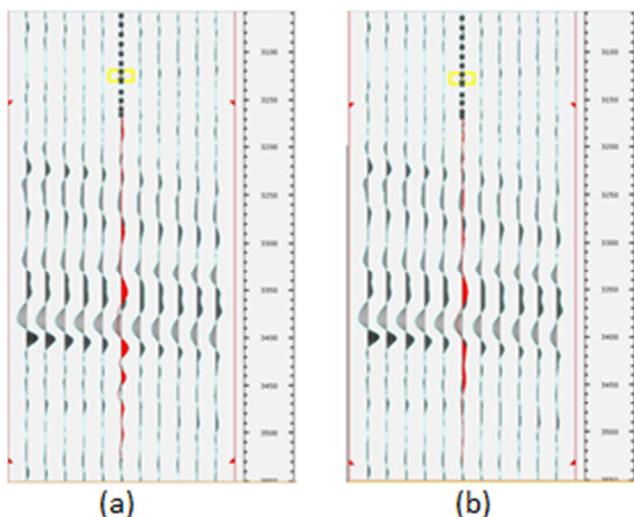


Figura 9 - Análise qualitativa, Sintético sobre a Sísmica, da Extraída (a) e da Ricker (b) para o poço C.

Conclusão

As análises qualitativa e quantitativa dos sintéticos gerados a partir das wavelet Ricker e wavelet Extraída demonstram o seguinte: para os três poços analisados, os sintéticos gerados a partir da wavelet Extraída obtiveram respostas mais correlacionáveis às sísmicas, quando comparadas àquelas obtidas pelos sintéticos baseados na wavelet Ricker. Na parte qualitativa, o resultado se repete, ou seja, os sintéticos das wavelets Extraídas expressaram diversos eventos da sísmica que o sintético da Ricker não conseguiu representar.

Para o Poço A, especificamente, onde o poço percorre duas regiões com respostas contrastantes de frequência, verifica-se como a escolha da Extraída é importante, pois o espectro de frequência contém ambas as regiões. O resultado é a facilidade de amarrar o poço com o sismograma da Extraída, uma vez que temos bons marcadores nas duas regiões. Assim para um poço que atravesse litologias com respostas tão diferentes, a escolha de uma frequência principal para criação do pulso sísmico (wavelet) pode retornar um sismograma sintético que mascare eventos de certa região da sísmica, e com isso, dificulte a amarração de um poço.

Os resultados de criação de sintético usando wavelet Ricker são bons e podem ser usados, já que valores de correlações cruzadas de aproximadamente 0,6 são considerados satisfatórios. Por sua vez, os sintéticos a partir da wavelet Extraída, por buscarem as informações do dado sísmico e com isso informações de geologia, obtiveram melhores resultados de correlações em todos os casos.

É recomendado o uso da wavelet Extraída para criação de sintético no processo de amarração de poços, pois a busca de informações geológicas contidas no

sismograma traz o sintético muito mais próximo da sísmica. Compensa-se, assim, toda a complexidade matemática envolvida no processo, uma vez que gera dados muito mais confiáveis.

Agradecimentos

Queremos agradecer ao Centro de Suporte a Interpretação, grupo que faz parte da gerência E&P/EXP/GEOF/GDSI da PETROBRAS, por todo apoio e estímulo.

Referências

- Gonçalves, L. A., 2004. Um estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- DUARTE, O. O., Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. 3rd ed. Rio de Janeiro: SBF, 2007.
- Ricker, N., 1945, *The computation of output disturbances from amplifiers for true wavelet inputs: Geophysics*, 10, 207-220.