

## ESPECTRO DE ENERGIA WAVELET PARA CARACTERIZAR REGISTROS SÍSMICOS

Francisco Edcarlos Alves Leite<sup>1,2,4</sup>; Marcos Vinícius Cândido Henriques<sup>1,2,5</sup>; Alane Farias dos Santos<sup>1,3,6</sup>; Maytê Tábata Nascimento Cunha<sup>1,2,7</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido

<sup>2</sup>Centro Multidisciplinar de Angicos

<sup>3</sup>Centro Multidisciplinar de Caraúbas

<sup>4</sup>edcarlos@ufersa.edu.br

<sup>5</sup>viniciuscandido@ufersa.edu.br

<sup>6</sup>alanefarias@gmail.com

<sup>7</sup>mayte\_tabata@hotmail.com

**Resumo:** Os registros sísmicos apresentam uma quantidade enorme de estruturas geológicas coerentes. Uma estrutura são as reflexões geológicas que conduzem informações sobre as interfaces geológicas do meio terrestre. Outra estrutura é o ruído *ground roll*, o qual é uma estrutura coerente, porém, indesejável e que está sempre presente nas imagens sísmicas. Este ruído aparece nas imagens como um sinal e que não carrega informações relevantes sobre as estruturas geológicas do solo. Nesse sentido, o *ground roll* deve ser atenuado de forma que possamos obter uma análise adequada da imagem e assim fazer aferições e predições sobre as estruturas geológicas. Este trabalho explora um método para aferir sobre estruturas coerentes presentes em imagens sísmicas, as quais são obtidas em um levantamento de prospecção sísmica terrestre. Aqui a imagem sísmica original foi analisada e processada utilizando a Transformada Wavelet Discreta para atenuar o ruído *ground roll*. Uma vez o ruído atenuado as imagens sísmicas são analisadas via Transformada Wavelet Discreta para obter o Espectro de Energia Wavelet de cada imagem e verificar as singularidades presentes. As singularidades das imagens foram analisadas de duas formas: (i) calculando o Espectro de Energia Wavelet das imagens completas e (ii) calculando o Espectro de Energia Wavelet de três regiões previamente escolhidas de cada imagem. A localização das singularidades mudam de acordo com a presença do *ground roll* e assim facilitando a localização e aferição do que é ruído e o que é sinal de interesse geológico.

**Palavras-chave:** Transformada Wavelet, Sísmica de Reflexão, *ground roll*, Espectro de Energia.

### 1. INTRODUÇÃO

A Sísmica de Reflexão é uma técnica de exploração sísmica, sendo que a indústria do petróleo a emprega em larga escala devido ao seu poder de resolução e ao seu custo relativamente baixo. É a principal técnica de construção de imagens do subsolo terrestre. Nesta técnica, ondas mecânicas são geradas artificialmente na superfície terrestre por explosões controladas. Essas ondas mecânicas propagam-se em direção ao interior do subsolo experimentando fenômenos físicos como o espalhamento, a refração, a difração, a reflexão, particionamento na energia e outros. As ondas refletidas pelas diferentes interfaces geológicas (heterogeneidade do meio) e que conseguem retornar a superfície, essas ondas são captadas

por um arranjo ordenado de sensores especiais, denominados geofones. Os geofones são distribuídos em superfície de forma geométrica regular. As ondas que conseguem retornar à superfície “conduzem” informações sobre as heterogeneidades do meio geológico no interior da Terra. Uma vez captadas pelo arranjo de geofones é possível construir graficamente uma imagem sísmica, ou registro sísmico ou ainda sismograma, que é uma imagem da formação geológica e geofísica do subsolo [Yilmaz, 2003]. A partir dessa imagem sísmica é possível detectar, prever e aferir algumas características das heterogeneidades do meio geológico.

Devido ao alto grau de desordem do meio geológico os reservatórios de petróleo são dominados por estruturas geológicas que constituem sistemas de alta complexidade, com heterogeneidades em todas as escalas e grandes flutuações em suas características, tais como permeabilidades e porosidades. Embora nos forneçam uma imagem adequada da estrutura geológica do subsolo, os registros sísmicos são submetidos a processamentos (processamento de sinais e imagens) para não acarretar erros de localização e quantificação de hidrocarbonetos. Um poço perfurado no local errado acarreta uma perda considerável nos recursos de uma empresa de exploração petrolífera. Portanto, o processamento e análise dos registros sísmicos, antes da perfuração de um poço, para detectar e prever algumas características físicas é tarefa muito importante e que representa desafios permanentes na exploração de petróleo. Isto demanda um esforço enorme para o desenvolvimento de metodologias de análise de sinais e imagens para um melhoramento dos dados coletados (registro sísmico) para uma análise posterior de suas características e propriedades geofísicas e geológicas. Diante disso, nos últimos anos, novas metodologias com novos métodos numéricos, modelagem para processamento e análise de sinais e imagens sísmicas, baseados em conceitos da Física Estatística e da Matemática evidenciaram um poder de análise utilizando a Transformada Wavelet.

A Transformada Wavelet é uma ferramenta matemática muito utilizada para se obter uma decomposição de um sinal em diferentes resoluções e, assim, visualizar o seu comportamento em várias escalas. A maior vantagem da Transformada Wavelet com relação à Transformada Clássica de Fourier é a possibilidade de se obter uma análise com localização tanto no espaço temporal quanto no espaço da frequência para sinais não estacionários cujas propriedades estatísticas são variantes com o tempo. Por essa razão, as wavelets são mais adequadas ao estudo de sinais e imagens geofísicas [Deighan and Watts (1997), Corso et al. (2003), Leite (2008), Leite (2009)].

## 1.1 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelets pode ser considerada como uma generalização da Transformada de Fourier, com algumas vantagens. É uma ferramenta de análise na qual se pode mudar a escala do tempo (ou do espaço). Ela torna possível obter uma representação “intermediária” de uma função ou de um conjunto de dados, na qual tanto a informação de localização espectral como temporal (ou espacial) estão disponíveis. Os parâmetros da Transformada Wavelet permitem uma análise variável que se ajusta as características dos sinais, por meio de uma análise janelada variável. Dessa forma, uma análise realizada através da Transformada Wavelet é um método de decomposição multiescala (multi-resolução) e, portanto, adequada para realizar varreduras mais eficientes e uma visão geral da geração de um modelo de simulação e hierarquia de modelagem [Mallat, 1989].

### 1.1.1. Transformada Wavelet Contínua

A Transformada Wavelet Contínua  $d(s, u)$  de uma função  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  na escala  $s$  e no tempo  $u$  é definida como sendo [Daubechies, 1992]:

$$d(s, u) = \langle f, \psi_{s,u} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{s,u}^* dt \quad [1]$$

onde

$$\psi_{s,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad [2]$$

representam as funções da base formadas por wavelets. Os parâmetros  $s$  e  $u$  são números reais, com  $s \neq 0$ , e que representam, respectivamente, dilatações no espaço e translações temporais da função  $\psi$ . Assim sendo, os coeficientes  $d(s, u)$  da transformada wavelet possuem representação dual e que representam medidas de correlações entre a função  $f(t)$  e as funções da base wavelets  $\psi$ . É uma integral inversível e suas translações em  $u$  (temporal) caracterizam as localizações da função e as dilatações em  $s$  (escala) caracterizam informações na frequência para as escalas.

### 1.1.2. Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta pode ser construída com a escolha de  $s = 2^j$  e  $u = n2^j$  com  $j$  e  $n$  inteiros. Cada valor de  $2^j$  é uma resolução na escala e  $j$  o índice de escala ou índice de resolução. As condições para a escolha da discretização são discutidas em Daubechies (1992). Dessa forma, a correspondente wavelet discreta  $\psi_{j,n}$  é definida como:

$$\psi_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi \left( \frac{t-n2^j}{2^j} \right) \quad [3]$$

e a transformada wavelet discreta é dada por

$$d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \left( \frac{t-n2^j}{2^j} \right) dt \quad [4]$$

onde  $j$  e  $n$  são parâmetros inteiros associados com as dilatações e translações temporais da wavelet, respectivamente. Nesse sentido, existe uma base de wavelets discretas  $\{\psi_{j,n}\}$  tal que, uma função  $f(t)$  pode ser expandida como uma combinação linear das funções dessa base:

$$f(t) = \sum_j \sum_n d_{j,n} \psi_{j,n}(t) \quad [5]$$

onde  $d_{j,n}$  são os coeficientes da transformada wavelet discreta da função  $f(t)$ , os quais são calculados por fazer o produto interno da função  $f(t)$  com as funções de base wavelets  $\psi_{j,n}$ . Esses coeficientes nos dão informações sobre o comportamento da função  $f(t)$  na resolução dual de escala  $2^j$  e tempo  $2^j n$ .

### 1.1.3. Espectro de Energia Wavelet

Os coeficientes da Transformada Wavelet Discreta  $d_{j,k}$  foram calculados para cada imagem sísmica em seus níveis de escalas. A partir destes nós definimos o Espectro de Energia Wavelet da seguinte forma [Leite, 2009]:

$$E(j) = \sum_k |d_{j,k}|^2 \quad [6]$$

O Espectro de Energia Wavelet será a caracterização das singularidades presentes nas imagens sísmicas.

## 2. METODOLOGIA

A imagem sísmica original aqui analisada para se alcançar o objetivo deste trabalho está representada na Figura 1(a). Esta imagem é definida como sendo uma matriz  $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$  de dados que é composta de valores reais formadas por  $n$  traços (elementos na vertical - colunas) e  $m$  amostras (elementos na horizontal - linhas). Os valores de  $m$  e  $n$  para a imagem aqui analisada são  $m = 2100$  e  $n = 89$ . No entanto, a imagem sísmica é uma matriz de ordem 2100 x 89.

A Figura 1(b) representa a imagem sísmica após a atenuação do ruído *ground roll*. Esta imagem contém informações geológicas de interesse. Podemos perceber as estruturas aproximadas de algumas hipérbolas. Estes são as informações de grande relevância para caracterizar as camadas do subsolo.

A Figura 1(c) representa a porção que foi removida da imagem original utilizando a Decomposição Multiescala. O método de Decomposição em Multiescala para a atenuação do *ground roll* está descrito em Leite [Leite, 2007].

Nas imagens sísmicas da Figura 1 podemos sinalizar três regiões bastante singulares. A primeira região (Região 1) foi definida entre os pontos (de cima pra baixo) 1 até 800. Esta região apresenta poucas hipérbolas e estas parecem ser “engolidas” pela superposição do ruído *ground roll*, o qual aparece na forma de um “cone” e de forma bem concentrado. A superposição acontece porque a energia do sinal ruidoso *ground roll* prevalece sobre a energia do sinal das hipérbolas. A segunda região (Região 2) foi definida como está entre os pontos 801 e 1300. Nesta região percebemos também a presença de superposição do *ground roll*, mas que, também, apresenta várias hipérbolas mais “avivadas”. Esta região pode caracterizar alta coerência e informações relevantes das interfaces geológicas. A terceira região (Região 3) foi definida está entre os pontos 1301 até 1800 e que apresenta poucas hipérbolas e o ruído *ground roll* aparece de forma mais espalhado (não concentrado como na Região 1).

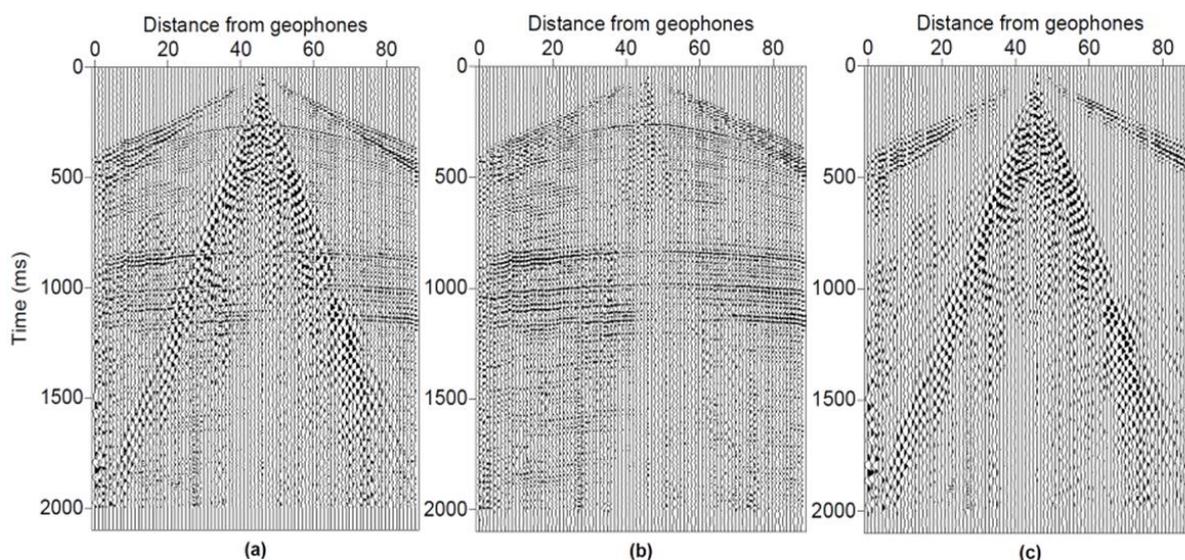


Figura 1 – Imagem sísmica utilizada pela Transformada Eavelet Discreta. Temos em (a) a imagem sísmica Original, (b) imagem atenuada após atenuação do ruído *ground roll* (imagem Limpa) e (c) imagem ruidosa que a “porção” que foi removida da imagem original (Ruído).

O Espectro de Energia Wavelet foi calculado conforme equação [6] para as três imagens sísmicas da Figura 1 e de duas formas: (i) na imagem completa e (ii) nas três regiões delimitadas para cada imagem. Para chegarmos a equação [6] do Espectro de Energia Wavelet nós decompomos em escalas as imagens sísmicas utilizando a Transformada Wavelet Discreta para se obter os coeficientes  $d_{j,k}$ . Tomamos o módulo

quadrado dos coeficientes e realizamos a soma em cada escala. De acordo com os resultados, podemos caracterizar visivelmente as energias presentes nas imagens completas e também nas três regiões de cada imagem. Neste sentido, o Espectro de Energia Wavelet configura uma coerência para cada imagem sísmica e para cada região delimitada das imagens.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho nós exploramos uma análise do Espectro de Energia  $E(j)$  formulado com base na Transformada Wavelet Discreta. Nossa metodologia foi aplicada em imagens sísmicas com intuito de identificar estruturas coerentes presentes nas imagens. A saber, as estruturas predominantes são o ruído *ground roll* e as hipérbolas que representam as interfaces geológicas do meio heterogêneo das interfaces terrestres.

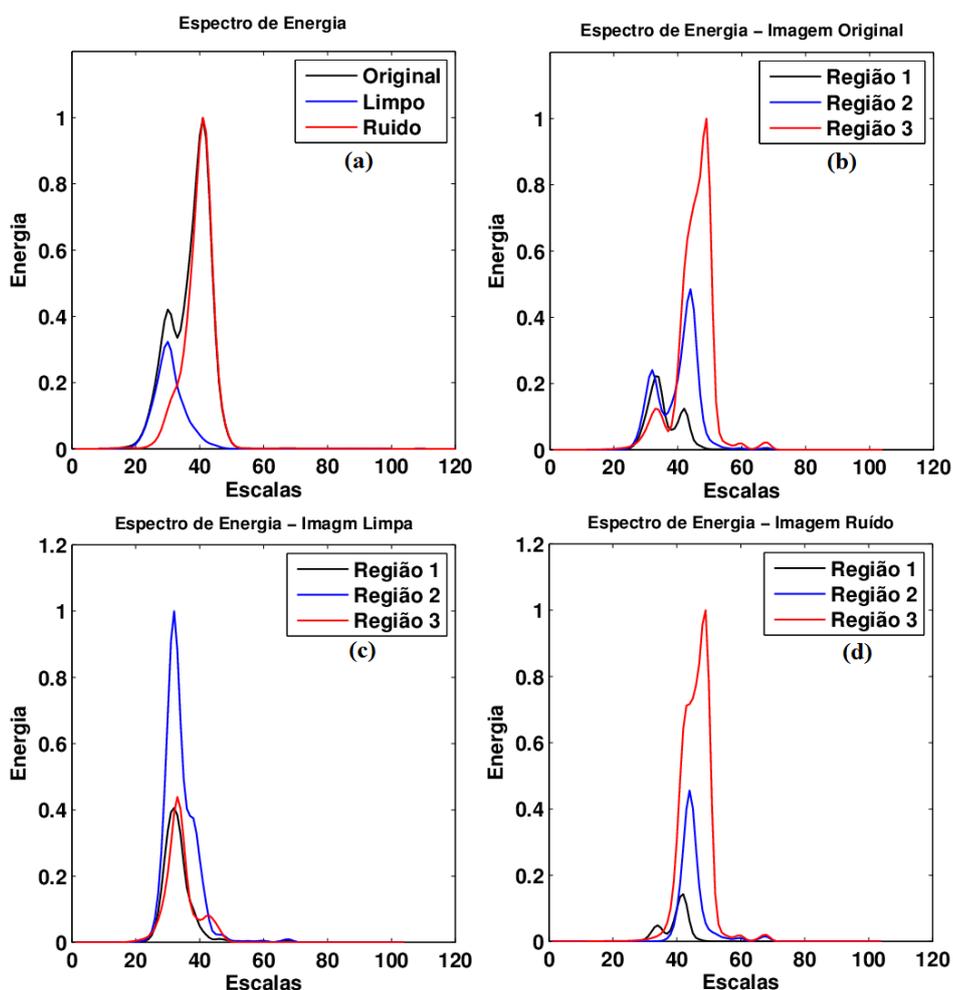


Figura 2 – Espectros de Energia Wavelet. Em (a) Espectro de Energia para as imagens da Figura 1, (b) Espectros para a imagem Original, (c) para a imagem Limpa e em (d) para a imagem Ruído

As coerências principais presentes na imagem sísmica original da Figura 1(a) são duas: as estruturas geológicas (hipérboles) e o ruído *ground roll*. Neste sentido, vamos detalhar nossa discussão em termos destas duas características. Na sequência de gráficos da Figura 2 temos a representação do Espectro de Energia Wavelet para as imagens sísmicas mostradas na Figura 1. Na Figura 2(a) temos os picos e suavizações dos Espectros de Energia são coincidentes para as imagens sísmicas Original e Limpa. O pico de Energia para a imagem Ruído está deslocado para a direita contendo a maior parte da energia do sinal desta imagem. Percebemos também que as suavizações dos Espectros de Energia para as imagens Original e Ruído são fortemente correlacionados.

Na Figura 2(b) temos os Espectros de Energia para três regiões da imagem Original. Percebemos que na Região 1 e Região 2 tem-se coerências para as energias. Estas regiões são aquelas onde aparecem a maior quantidade de hipórbolas, porém, o *ground roll* está presente e tende a superpor-se a energia. Na Figura 2(c) temos os Espectros de Energia para as três regiões da imagem Limpa. Perceba que a energia das hipórbolas (Região 2) prevalece sobre as demais regiões. Isto é muito importante para se saber se a atenuação do ruído foi realizado adequadamente.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados alcançados e apresentados aqui neste trabalho efetivam a potencialidade da Transformada Wavelet e sua aplicabilidade na sísmica de reflexão. Essa potencialidade se caracteriza em sua natureza de realizar análise em tempo e escala. O método de Decomposição Multiescala, para atenuação de ruído, tem se mostrado eficiente no sentido de preservar as informações de interesse geológicas e atenuar o ruído *ground roll*.

No que tange as informações sobre as coerências geológicas, nós aplicamos o Espectro de Energia Wavelet. Os resultados são muito bons e, claramente visualizamos as características de coerências analisando a imagem como um todo e também tratando as imagens em três regiões que julgamos serem as regiões mais efetivas de importâncias para a prospecção sísmica.

A relação de sistemas e problemas a estudar está longe de ser exaustiva, pelo contrário sempre está aberta a possibilidade de ser incrementada com novos problemas que podem ser resolvidos no contexto geral de um conhecimento mais profundo da interação interdisciplinar entre a Física a Matemática e as Ciências da Terra. A transformada em wavelets também permite a medida das características fractais ou multi-

fractais de séries temporais que apresentam invariância por escalas [Santos, 2015]. Isto significa que com esta transformada podemos analisar em detalhe o espectro de singularidades dos sinais e, em particular, o expoente de hurst.

## 5. REFERÊNCIAS

Corso, G., Kuhn, P. S., Lucena, L. S., Thomé, Z. D. (2003); *Seismic Ground Roll Time-Frequency Filtering using the Gaussian Wavelet Transform*. Physica A, 318, 551 – 561.

Daubechies, I. (1992); *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia.

Deighan, A. J., Watts, D. R. (1997); *Ground-roll suppression using the wavelet transform*. Geophysics, 62(6), 1896 – 1903.

Leite, F. E. A. *Análise Estatística de Padrões Sísmicos: Decomposição em Multiescala*. 2007, 135p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Física. Natal – RN

Leite, F.E.A., Montagne, R., Corso, G., Vasconcelos, G., Lucena, L. S. (2008); *Optimal wavelet filter for suppression of coherent noise with an application to seismic data*. Physica A, 387, pp. 1439.

Leite, F.E.A., Montagne, R., Corso, G., Lucena, L.S. (2009) *Seismic entangled patterns analyzed via multiresolution decomposition*. Nonlinear Processes in Geophysics, vol. 16, pp. 211 – 217.

Mallat, S. (1999); *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, New York.

Santos, A. F., Leite, F. E. A., (2015); *Estimativa do Expoente de Hurst em Dados Sísmicos Utilizando Análise Fractal*. I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. CONEPETRO – Campina Grande – PB. Anais CONEPETRO, Realize Editora, 2105, vol. 01.

Yilmaz, O. (1987); *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, (USA).