

**Wavelet Coherence in Complex
Systems**

UFRN

COMPLEX

SYSTEMS

FOUNDATIONS AND
APPLICATIONS

Liacir S. Lucena

Work done in collaboration with

- Marcos Vinícius C. Henriques (UFERSA)
- Francisco Edcarlos A. Leite (UFERSA)
- Moacir L. Neto (PETROBRAS)
- Roberto S. Andrade (UFBA)
- José S. de Andrade Jr. (UFC)

Congratulations Constantino!





**We want you a long life to continue to see you
playing the beautiful game of Physics**

Constantino, the sower of Statistical Physics



A little bit of History

A tentative to create
the International
Center for Complex
Systems in Natal,
1995

Aug. 24 '95 12:06 DDF - CCEN - UFPE FAX: 55-081-2718442 P. 1

RICARDO FERREIRA

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Química Fundamental
50.670-901, Recife, PE - Brasil
E-MAIL: RFERREIRA@NPD.UFPE.BR
PHONE: (081) 271-8440 (R-49) FAX: (081) 271-8442

Recife, 24 de Agosto de 1995

Professor Liacir Lucena
DF / UFRN, Natal
FAX: 084 231-9749

Caro Liacir:

Estou enviando nas próximas 6 páginas a correspondência fax com Constantino e o Vargas.

Incluo também trechos de 2 e-mails que foram trocados entre os mesmos correspondentes e que ajudam a vocês verem a situação em melhor perspectiva.

Um grande abraço de,

Ricardo
Ricardo.

- 11.08.95 Const. Para Ricardo: "A idéia de Natal me entusiasma por uma série de razões, que você conhece ou advinha"
- 12.08.95 Ricardo para Constantino: "Vai continuar chovendo no sertão e o meu desejo é que esta chuva caia também para nossos amigos de Natal."

A little bit of History - 2

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Gabinete do Reitor

Natal, 12 de Setembro de 1995

Ao Exmo. Sr. Dr. José Israel Vargas
M.D. Ministro da Ciência e Tecnologia

Sr. Ministro:

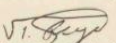
Venho manifestar oficialmente a V. Excia, o elevado interesse da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, na implantação, em Natal, do **Centro Internacional de Física dos Sistemas Complexos**, que tem o objetivo de dinamizar as pesquisas em andamento na universidade nessa área e promover uma maior integração dos nossos pesquisadores na comunidade científica mundial.

Esta proposta realmente representa a culminação de um grande esforço do Departamento de Física da UFRN, realizado num período de mais de 20 anos, direcionado no sentido de criar um ambiente científico de alto nível. O professor Constantino Tsallis, portador da presente missiva, participou efetivamente da formação deste núcleo de excelência que, sem nenhuma dúvida, atingiu um nível internacional. Cabe destacar que este resultado foi alcançado com modesta contribuição das agências federais de fomento e boa utilização dos recursos próprios da universidade. Objetivamente este núcleo pode mostrar, hoje, recursos humanos qualificados (30 doutores), uma sólida produção científica e Cursos de Mestrado e Doutorado em pleno funcionamento.

Neste momento, estamos em condição, e é o nosso grande anseio, de dar um salto de qualidade, para o que precisamos do apoio forte desse Ministério. O Centro Internacional de Física dos Sistemas Complexos, que estamos decididos a criar, com a sua estrutura ágil e dinâmica, será o catalizador capaz de proporcionar o rápido intercâmbio de pesquisadores e de novas idéias neste novo mundo dos sistemas complexos, dando sequência a uma vocação natural já demonstrada pela UFRN. Temos certeza que, este centro, tendo a sua frente o Professor Constantino Tsallis, terá êxito assegurado, possibilitando atingirmos uma posição de liderança no cenário mundial.

Esperamos contar com o entusiasmo de V. Excia para este empreendimento que se enquadra dentro dos Planos de Desenvolvimento da Ciência no Brasil, pelos quais V. Excia. tem tanto lutado.

Cordiais Saudações


Prof. José Ivonaldo do Rego
Reitor



Governo do Estado do Rio Grande do Norte
Gabinete do Governador

Ofício nº 610/95-GE

Natal(RN), 13 de setembro de 1995

Senhor Ministro:

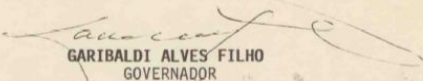
O Estado do Rio Grande do Norte, sintonizado com a política de desenvolvimento científico e tecnológico tão bem defendida por Vossa Excelência, dá hoje um grande passo para promover este setor. Acabo de sancionar, nesta data, o Projeto de Lei que cria o Fundo Estadual de Ciência e Tecnologia destinado automaticamente recursos do orçamento estadual para as atividades de fomento.

Demonstrando o empenho do Rio Grande do Norte em apoiar a Ciência e a Tecnologia, entendidas como ingredientes indispensáveis ao desenvolvimento econômico, julgo o momento oportuno para propor uma parceria a esse Ministério, para viabilizar o projeto de criação do Centro Internacional de Física dos Sistemas Complexos, a ser localizado em Natal, junto à Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Conhecedor das intenções divulgadas por Vossa Excelência de estimular a implantação de novos núcleos de excelência em todo o território brasileiro, considero que a proposta apresentada pela UFRN se harmoniza perfeitamente com os meus planos de governo na área científica e tecnológica.

Tenho consciência de que, entre as vocações do nosso Estado, uma das mais importantes será a sua transformação num pólo científico de alto nível, com o aproveitamento das competências e do potencial humano de que dispomos, e da criação de mecanismos eficientes de intercâmbio com órgãos de pesquisa em todo o mundo. Nesse sentido, desejo expressar meu total apoio à iniciativa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte de criar o Centro Internacional de Física dos Sistemas Complexos, entidade que, em futuro próximo, deverá atrair para o Rio Grande do Norte empresas de alta tecnologia contribuindo, simultaneamente, para o maior desenvolvimento científico e cultural da região.

Desejo, assim, comunicar-lhe meu compromisso de envidar todos os esforços em prol da concretização deste projeto, solicitando, ao mesmo tempo, sua alta colaboração no mesmo sentido.

Cordiais Saudações,


GARIBALDI ALVES FILHO
GOVERNADOR

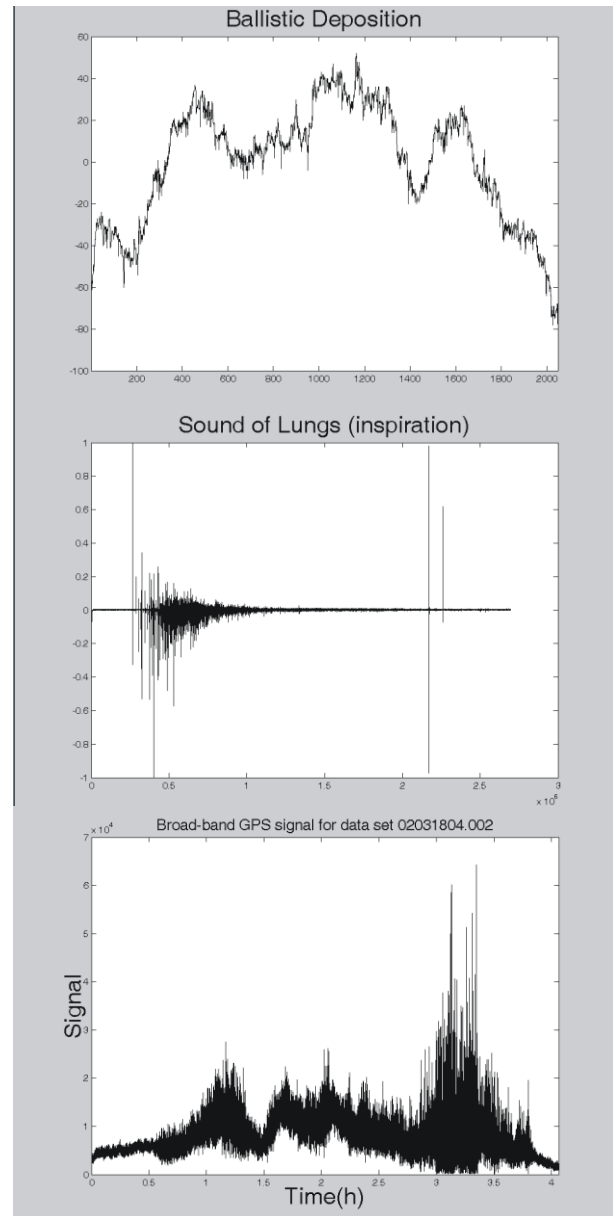
Exmo. Sr.
Dr. JOSÉ ISRAEL VARGAS
MD. Ministro de Ciência e Tecnologia
BRÁSILIA-DF

Characteristics of Complex Systems

- Large Number of Elements
- Non-Linearity
- Fractality or Multifractality
- Singular Behavior
- Criticality

Data from Complex Systems

- Huge amount of Data
- Random
- Noisy
- Non-Stationary
- Scale Dependent Measurements
- Large fluctuations



Some Examples of Complex Systems

- Human Lung
- Formation of Sandstones
- Plasma Instabilities in the Ionosphere
- Biomedical Time Series
- Cultural Networks
- Linguistic Networks
- Petroleum Reservoirs
- Brazilian Economy

Challenges

- How to treat, analyse and understand **natural** complex systems ?
- How to process and denoise **non-stationary data** ?
- How to decompose and study these data in different **scales**?
- How to find the best representations to “uncover” **hidden** structures?
- How to get **good images** of these Complex Systems ?
- How to **identify relevant patterns** in the system, even if they are small and weak and are masked by a strong **noise**?
- How find and match correlated parts and how to measure the **correlations** between these parts in a given Complex System ?
- To look for spectral techniques in which the representations of the systems are **sparse**

It is equivalent to find a needle in a hay stack !

Petroleum Reservoirs

(A difficult problem that we revisit very often)

- Economic Relevance (Brasil makes a bet on it)
- **Sub-salt** geological structures are more “complex”
- Standard **Geostatistics methods** (Krigging) give very smoothed results, killing the heterogeneities and leading to wrong predictions
- The imaging of the subsurface geological structures by conventional methods (ray tracing, stacking, migration, CRS, that means geometrical optics) show poor resolution, confusing and incomplete pictures or even images different from the reality

A “vida fácil” acabou (there is no free lunch anymore)

- To improve the quality of the subsurface regions **we have to solve the Complete Inverse Problem of the Wave Equation**
- This problem is much more harder than the **Imaging problem in Medicine**
- The number of unknowns is much more bigger than the quantity of data and equatio
- If the medium is **completely random** there is no way to determine the solution.
- Any hope ?
- **Hint: To learn from the women**

Learning from the women

- The “sixth sense”
- Large number of unknowns versus small amount of data
- The **correlations** between the geological structures generate constraints that can regularize the problem
- New techniques: **Compressive sensing**, FWI, etc
- Need of large computers
- Anchoring simulations in real measurements (well logs)
- Relevance of the correlation measures between well logs for the determination of the interfaces between geological structures

Practical problems:

How to find and characterize petroleum reservoirs?

How to get good images from the geological structures ?

Are 2 petroleum occurrences connected or not ? (do they belong to the same reservoir?)

How to measure the similarity between the geological structures?

How to improve the confidence degree in the analysis of correlations between well logs between different wells and from different quantities in the same well ?

Motivation

- **Petroleum Industry is full of Uncertainty and Risk.**
- There are challenging problems (e.g. Sub-salt)
- The major richness of the petroleum companies is the detailed knowledge of the properties of the regions underground.
- In the Petroleum Exploration and Risk Analysis, the most valuable data is given by the well logs (very expansive costs and hard to obtain).
- Therefore we have to extract the maximum relevant information from the well logs using concepts from Statistical Physics and new mathematical tools.

Some facts

- The well logs record the vertical **variability of the physical quantities**, measured by sensors that move along the wells.
- This strong vertical variability, apparently of random nature, really shows statistical correlations that have been generated by the geological evolution and by physical processes during the diagenesis and the transformation of the rocks.

Some facts II

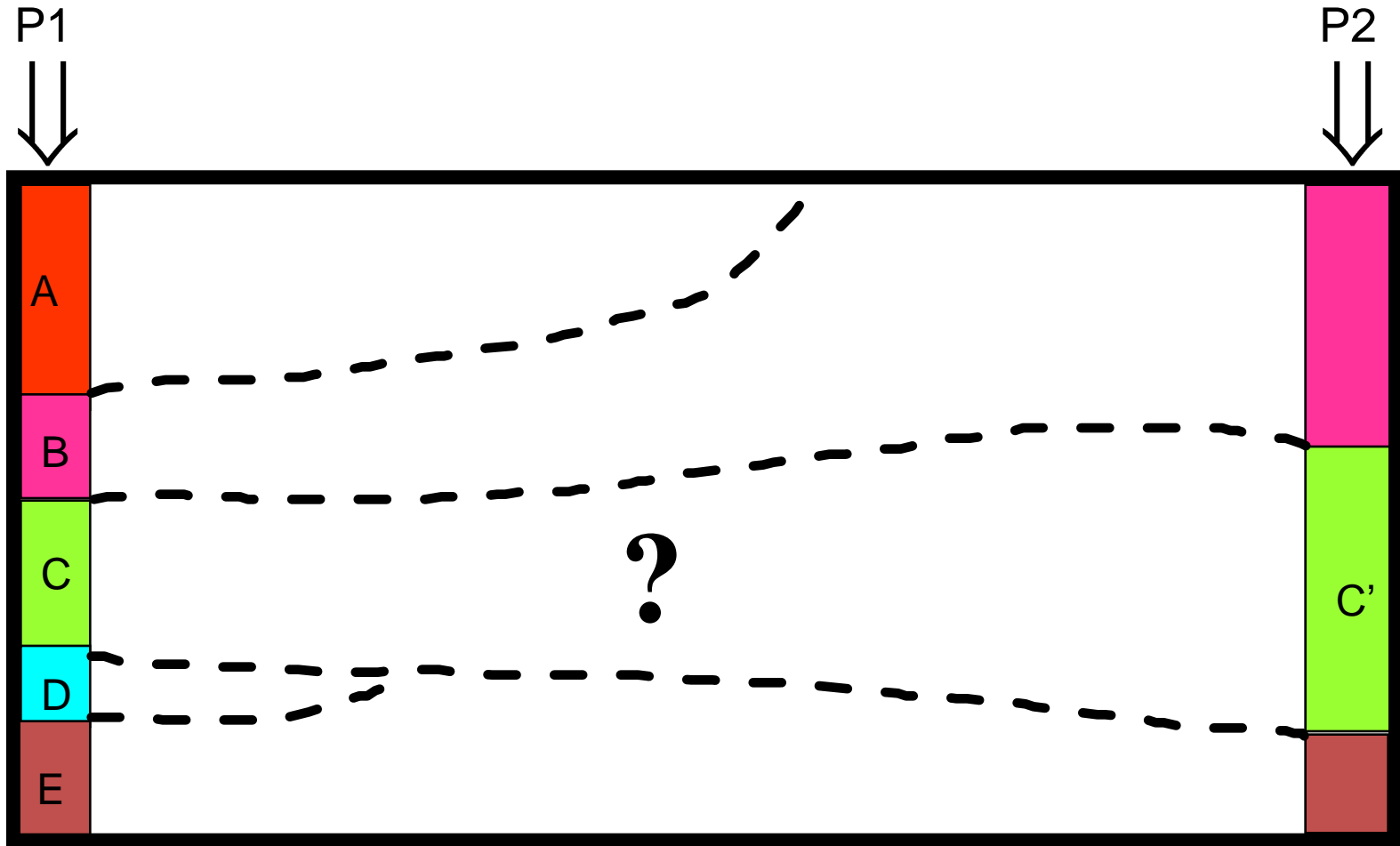
- Gravitational potential symmetry generated in first approximation a tendency for horizontal continuity of the geological structures.
- There were however effects and factors that perturbed this tendency, producing failures and vertical displacements, **heterogeneities**, noise, etc.

What is the problem ?

- To analyse, with more confidence, the degree of similarity between regions whose properties are registered by well log segments, obtained in nearby located wells, to know if they have the same geological structure (for instance, if they are in the same reservoir or if they are not connected)

Uncertainty

Are the similar structures C and C' connected ?

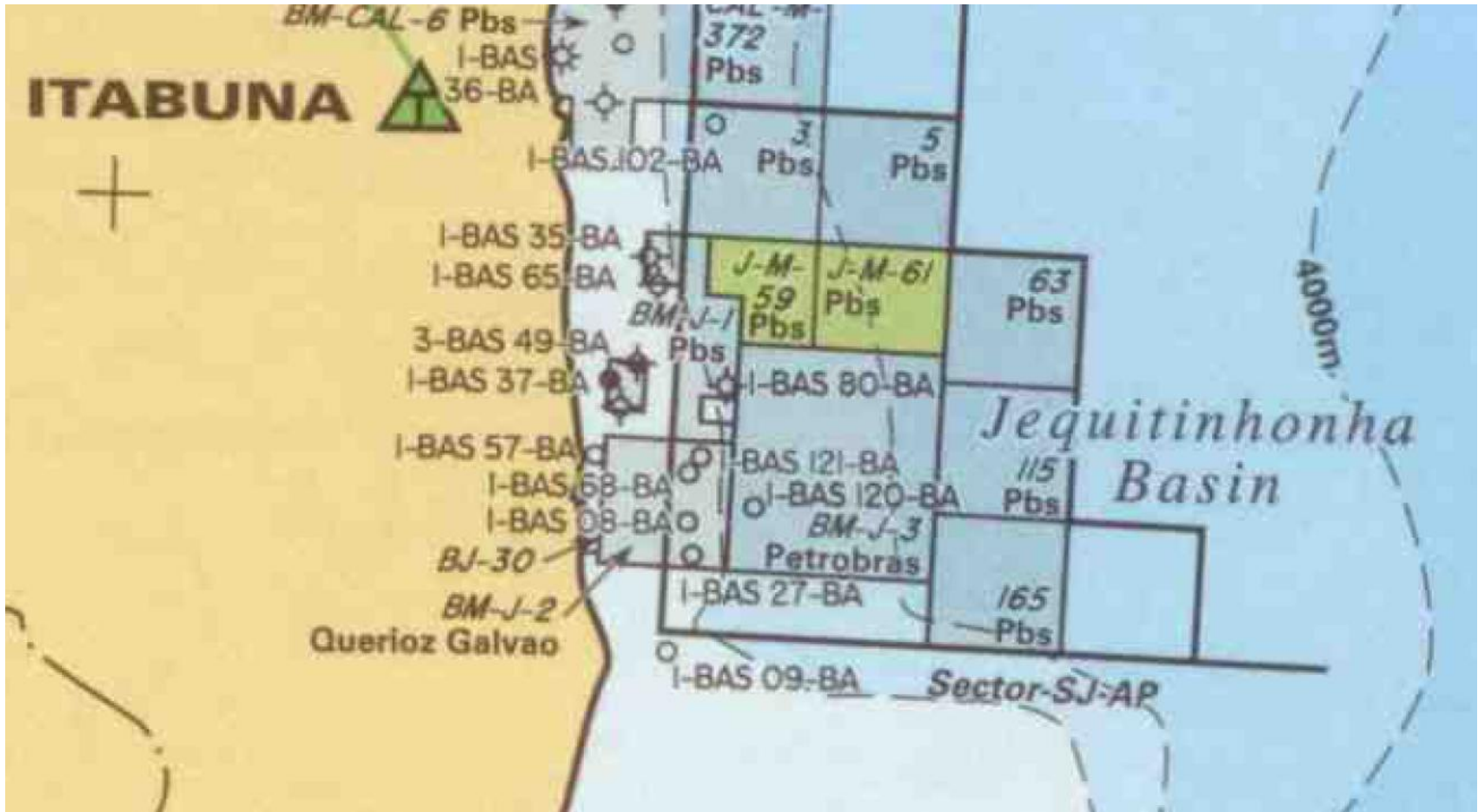


Por que este problema é importante ?

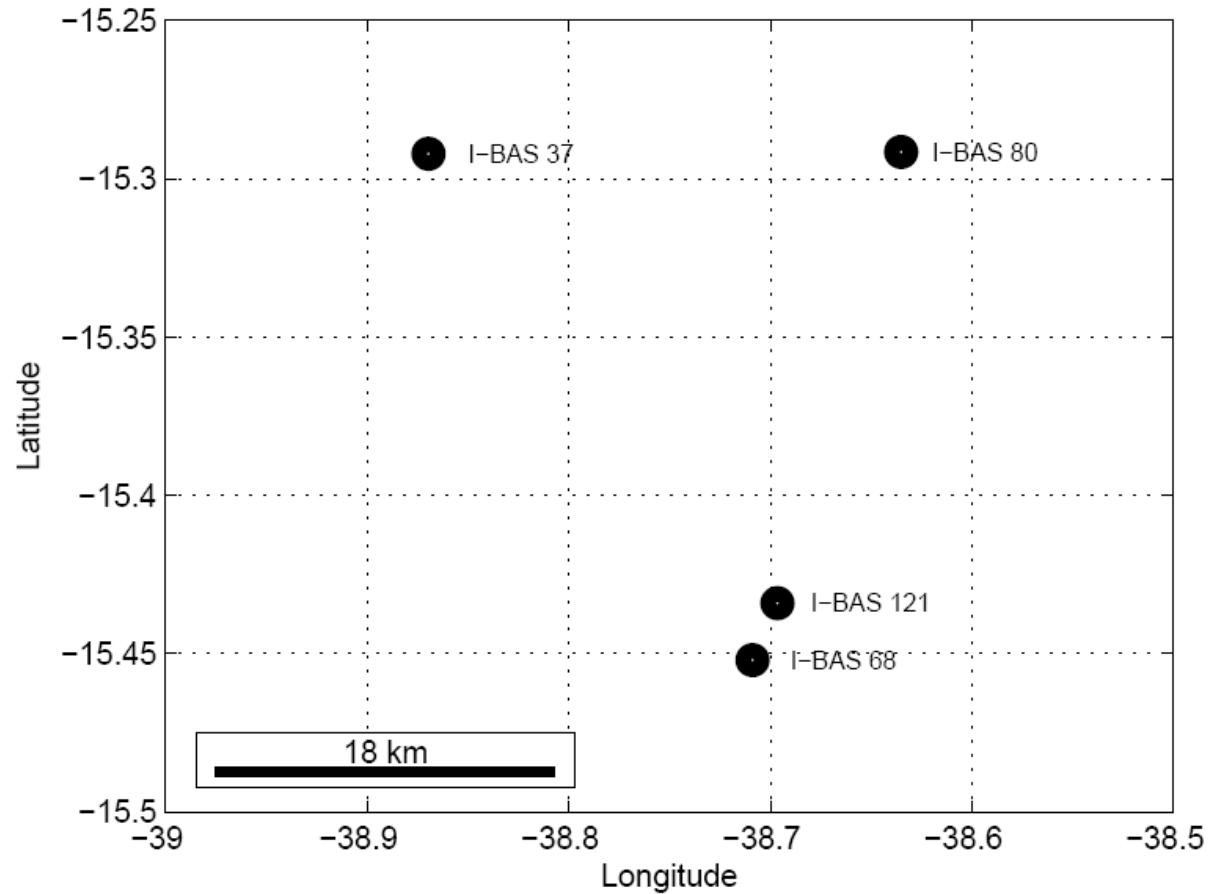
- Este problema é de importância crucial em situações em que a visualização sísmica é difícil, tais como no “Pré-sal” e na plataforma continental em frente à costa do Rio Grande do Norte.
- Outra possível utilização será descobrir, com mais precisão, estruturas em reservatórios no mar (onde a informação é muito limitada) análogas às dos reservatórios em terra.

A real case

Localization of the wells 1BAS-68 e 1BAS-121



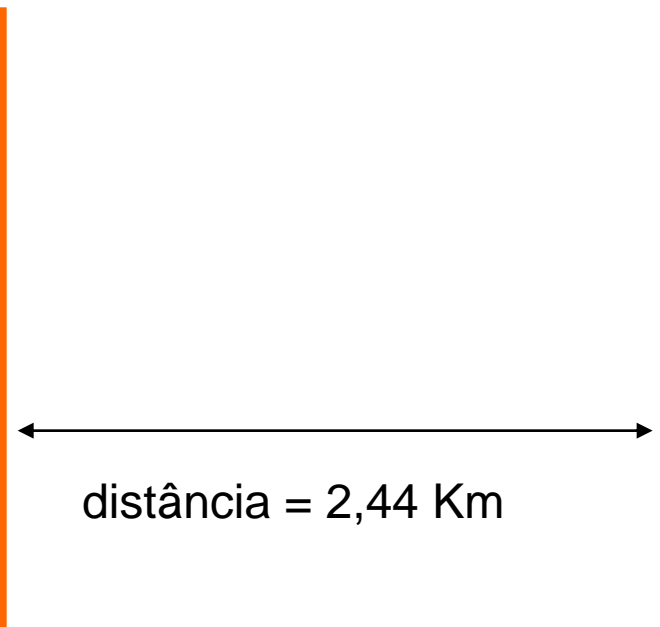
Localization of the wells



Distância entre os 2 poços

1 BAS 68

1 BAS 121



Some Well Logs

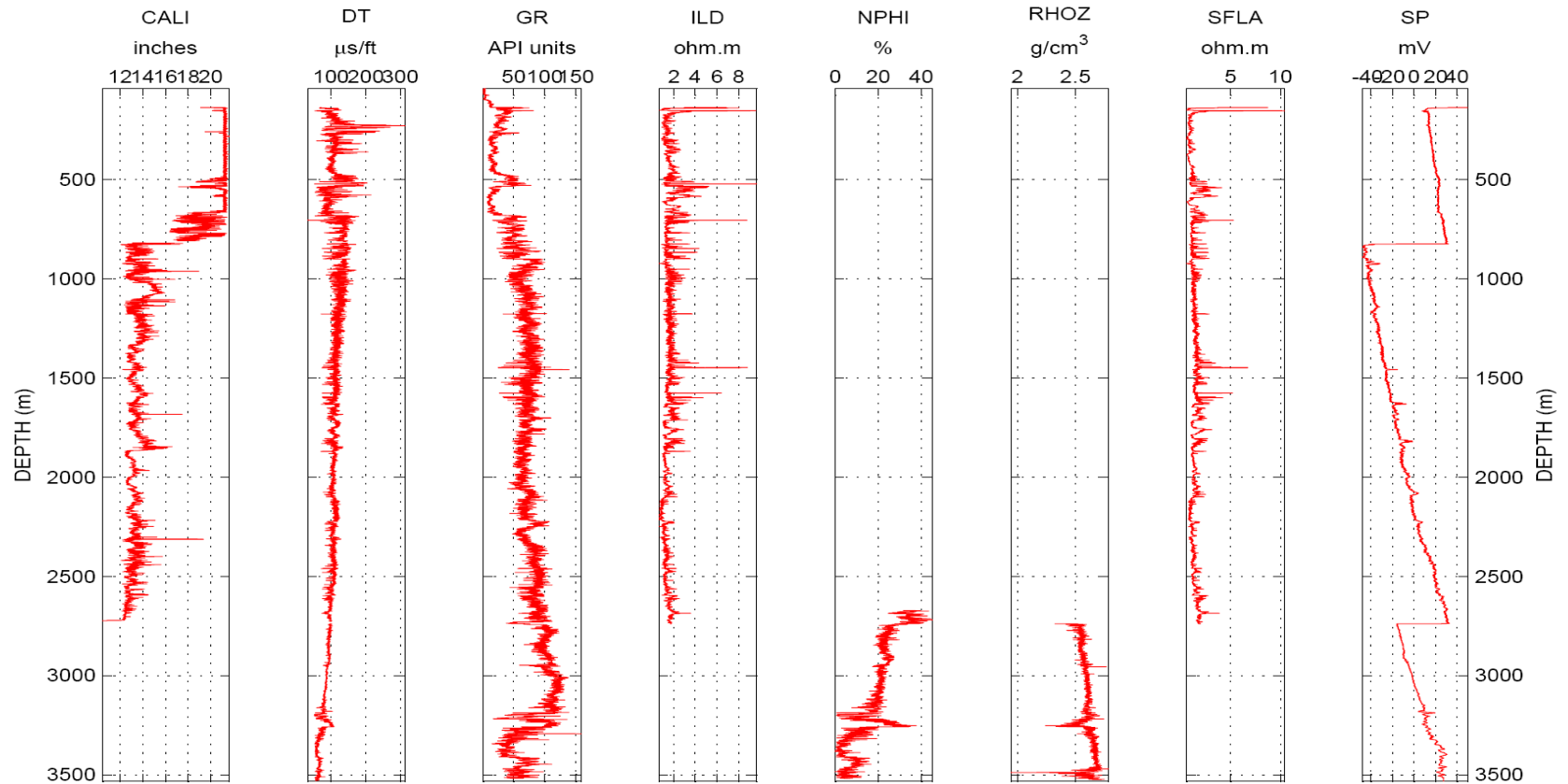
- **GR** (intensidade de Raios Gama naturais)
- **DT** (perfil sônico ou vagarosidade das ondas de pressão). A vagarosidade DT em $\mu\text{s}/\text{ft}$ é convertida para uma velocidade **VEL** em m/s por

$$\text{VEL} = 304800 / \text{DT}$$

- **ILD** (resistividade medida por indução)
- **NPHI** (porosidade medida por neutrons térmicos)
- **RHOB** (densidade incluindo o espaço poroso preenchido com fluidos)

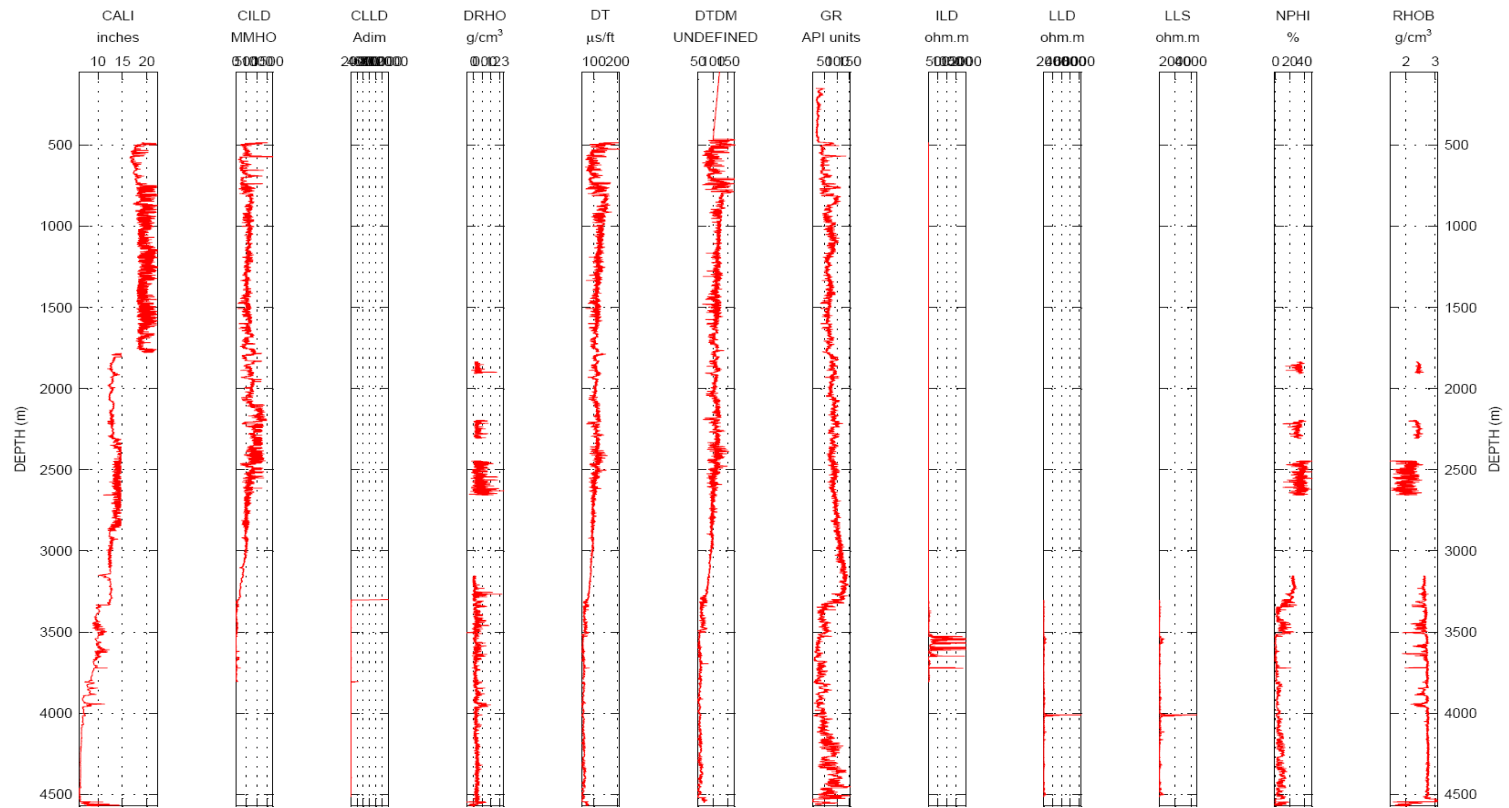
Some well logs from the well 1bas121

1bas121



Some well logs from the well 1bas68

1bas68



What are the proper tools ?

Natural choice
for Analysis &
Simulations

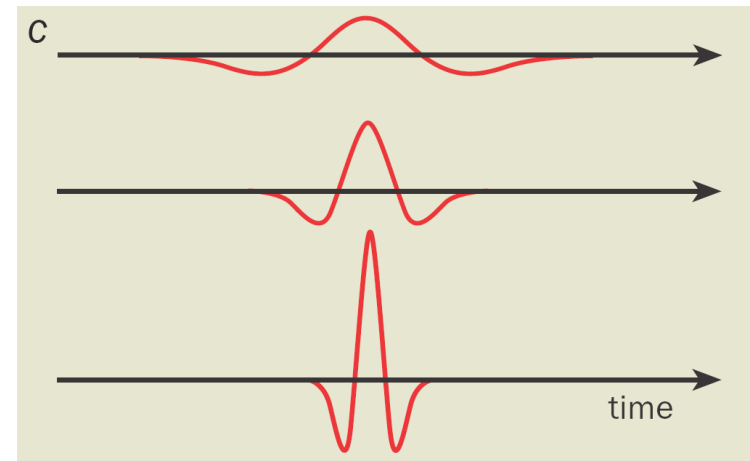
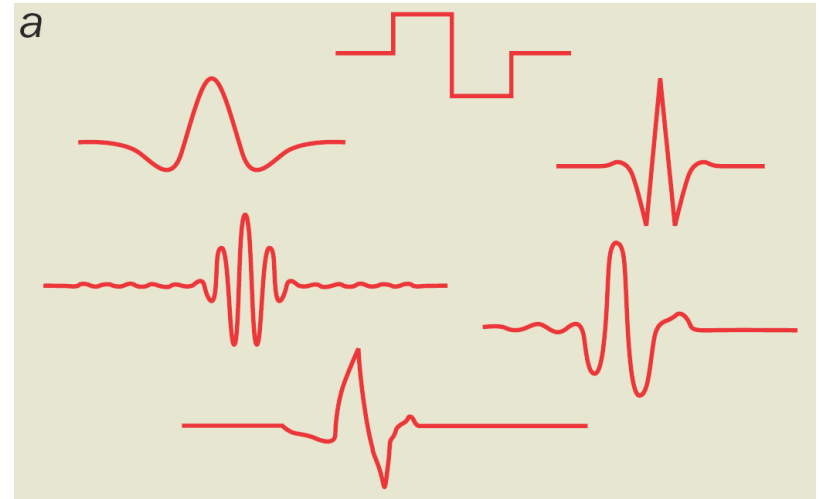
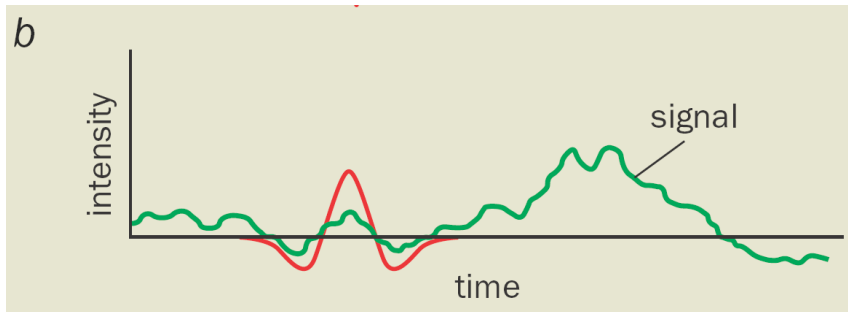


New spectral
representation
tools:

Wavelet based
Techniques

Curvelets, etc

Wavelet Transform

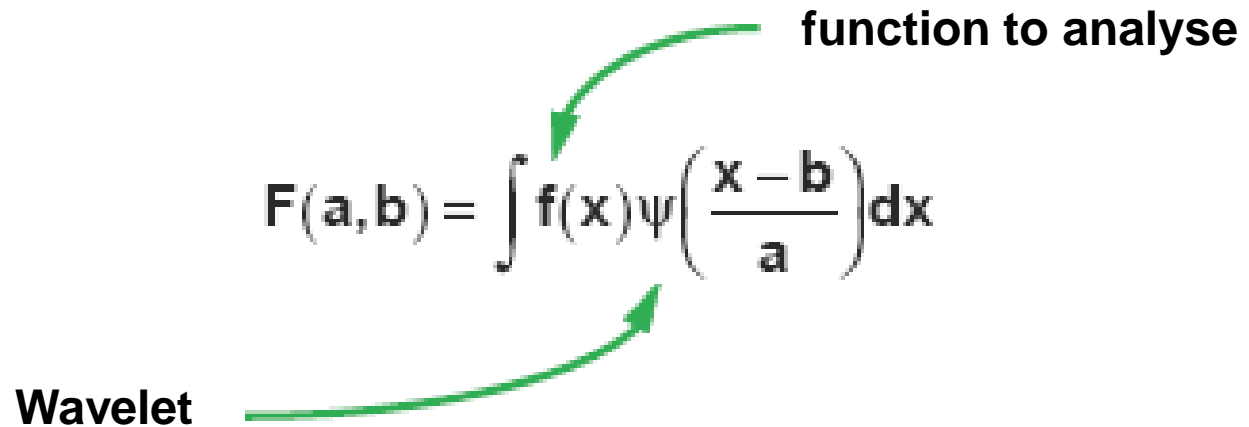


Wavelet Transform

function to analyse

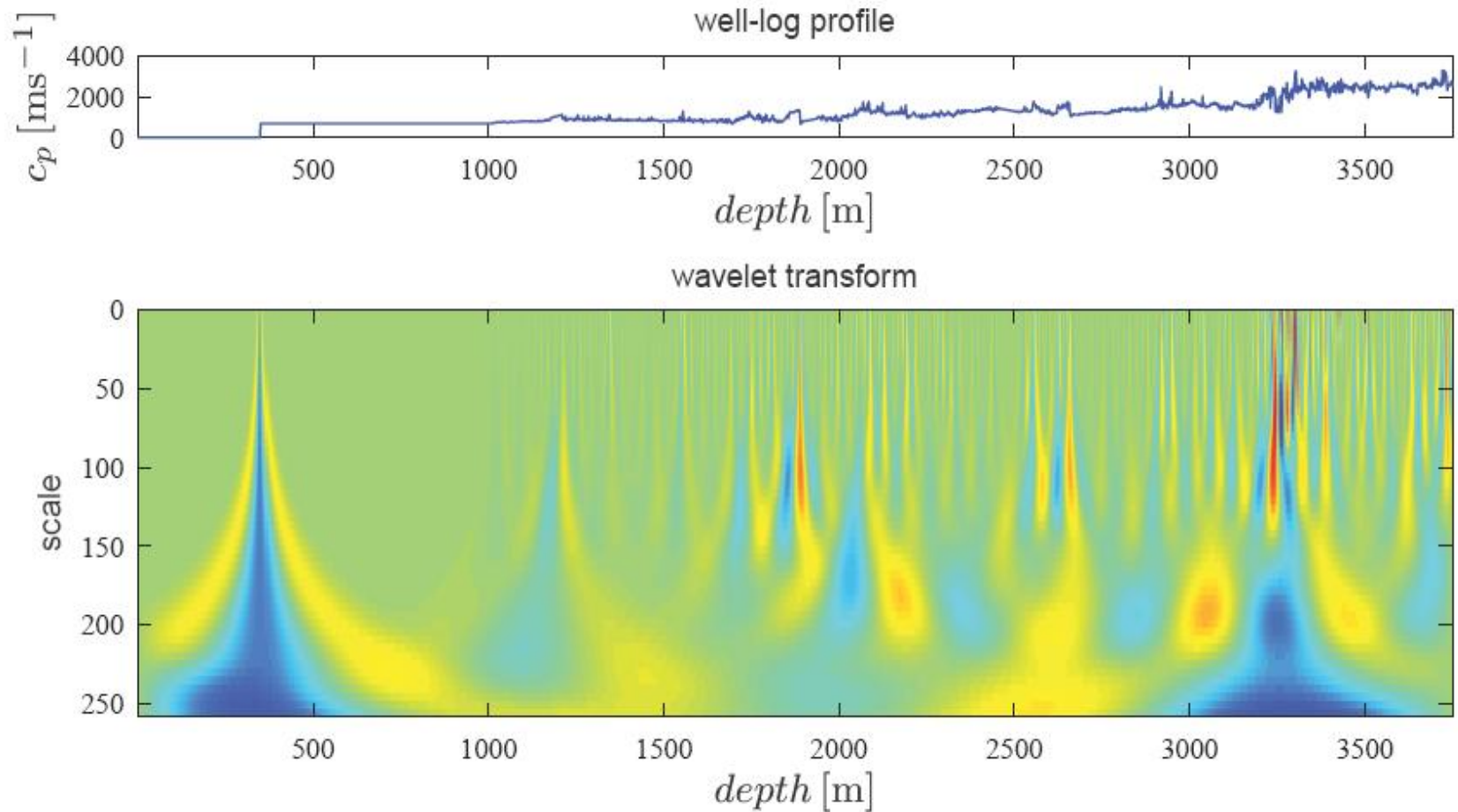
$$F(a,b) = \int f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$$

Wavelet



Idéia: To find the component of the function **a** and position **b**

Example of Wavelet Transform



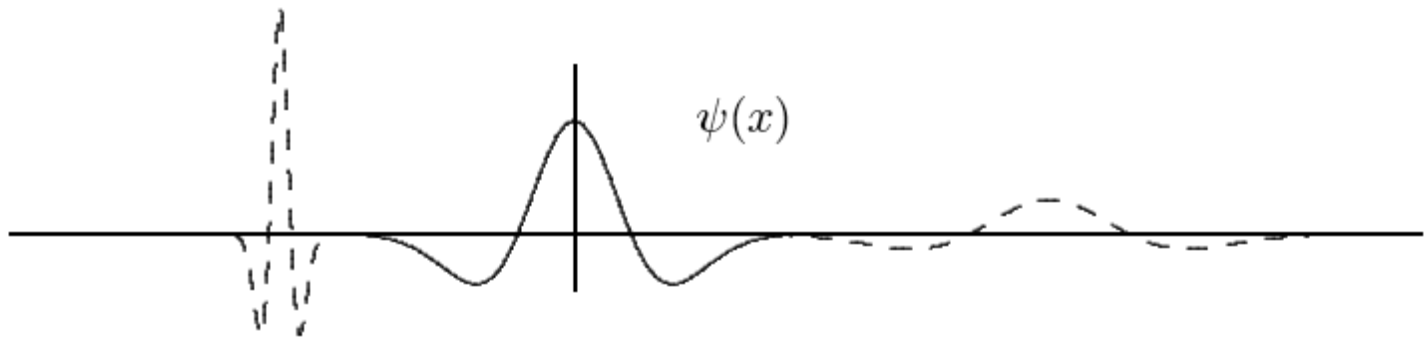
Continuous Wavelet Transform

- wavelet

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{b}} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right)$$

- decomposition

$$W(a,b) = K \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx$$



The Continuous Wavelet Transform

- reconstruct
$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} W(a, b) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{dadb}{a^2}$$

- admissibility condition:
$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\psi}(t)|^2 \frac{dt}{t} < +\infty$$

- simpler condition : zero average wavelet
$$\hat{\psi}(0) = 0$$

Discrete Wavelet

Scaling function

coefficients

Wavelets

coefficients

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f, \varphi_{J,k} \rangle \varphi_{J,k}(x) + \sum_{j \geq J} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(x)$$

Aproximation in
the J scale

+

Sum of details in
the j scales

Some Applications of Wavelets in the Analysis of Complex Systems

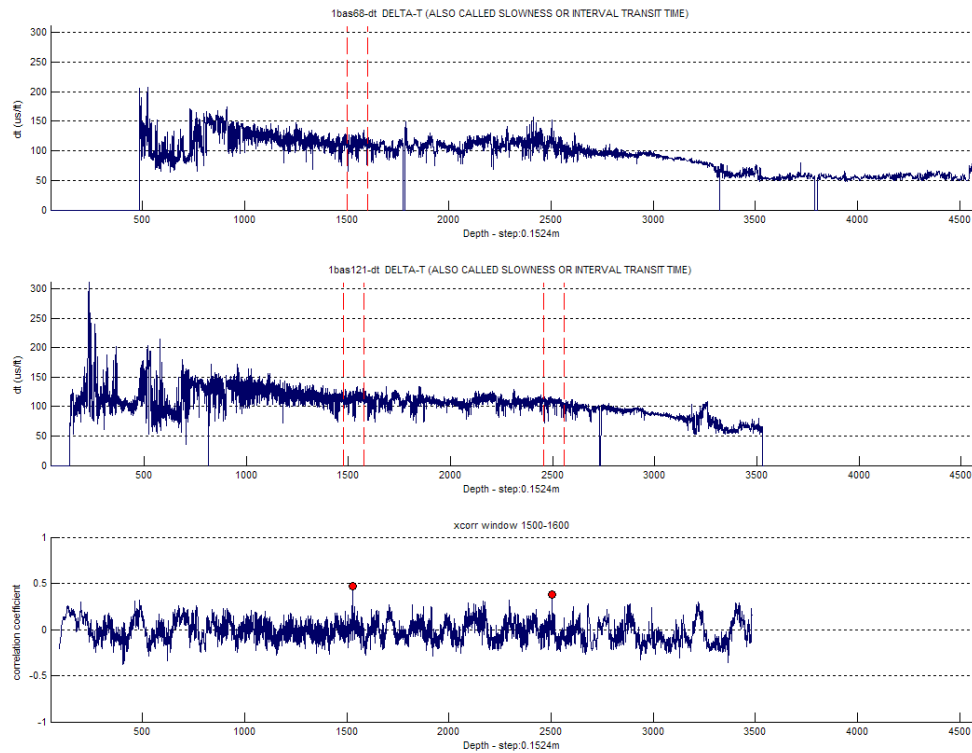
- Wavelet Denoising Filters (Corso, Kuhn, Lucena & Thomé, *Physica A* **318** (2003) 551-561)
- Wavelet Data Compression
- Finite Resolution Entropy in Wavelet Space (Tavares and Lucena, *Physica A* 2005)
- Models for Correlated Multifractal Hypersurfaces (Tavares and Lucena, *PRE* **67**, 036702, 2003)
- Estimating Thermal Conductivities from Temperature Maps (Roux and Lucena, *Inv. Probl. Science Engineering*, 2006)
- Evolution of Sandstone Structures (Hansen, Lucena and da Silva 2010)

Correlações Cruzadas entre Perfis de Poços no Espaço da Wavelets

- Objetivo: Tentar analisar, com mais confiabilidade, trechos de dois perfis, obtidos em poços de petróleo relativamente próximos, para saber se pertencem à mesma estrutura geológica (por exemplo ao mesmo reservatório).

Standard windowed cross correlation between well logs in different wells

[data brushing](#)

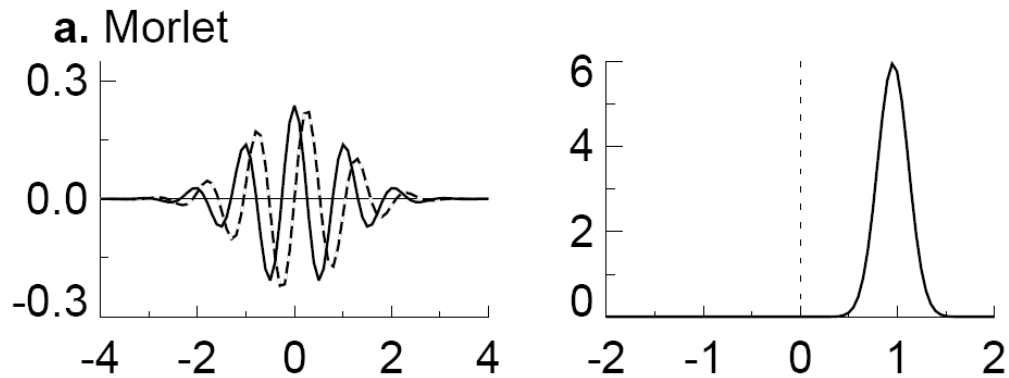


Results in the standard windowed cross correlation

- Many correlation maxima
- The identification of similar structures is not univocal
- The results are not conclusive

Morlet Wavelet

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2}$$



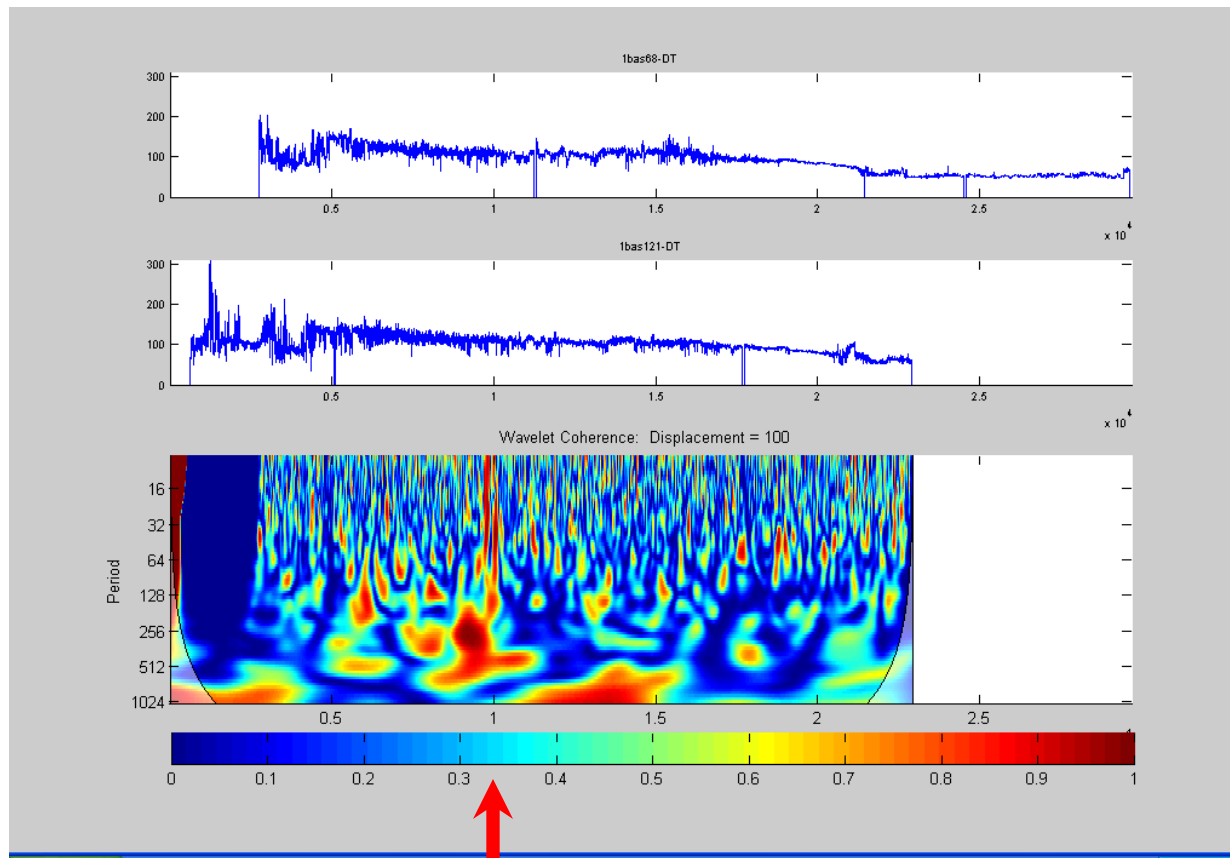
Cross correlation in the Wavelet space

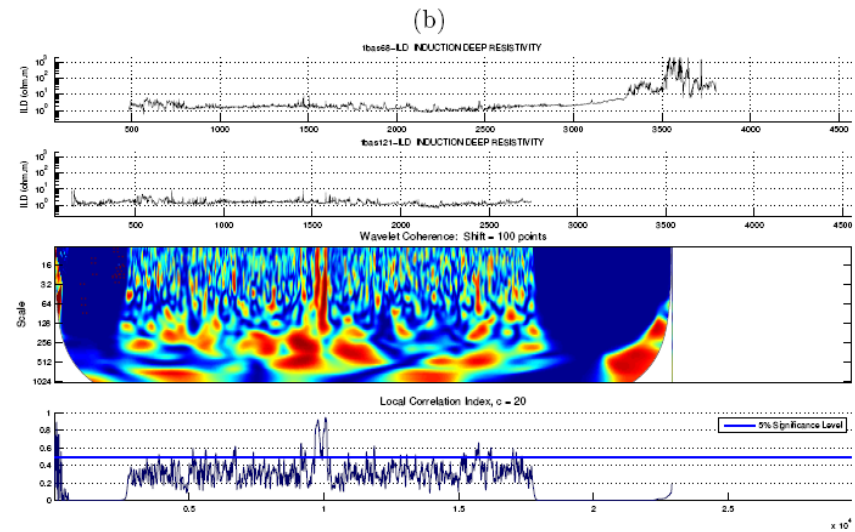
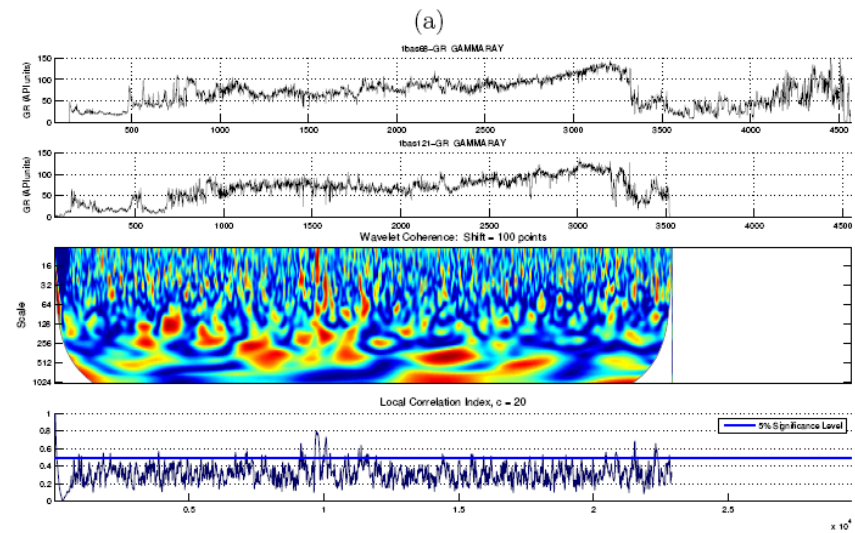
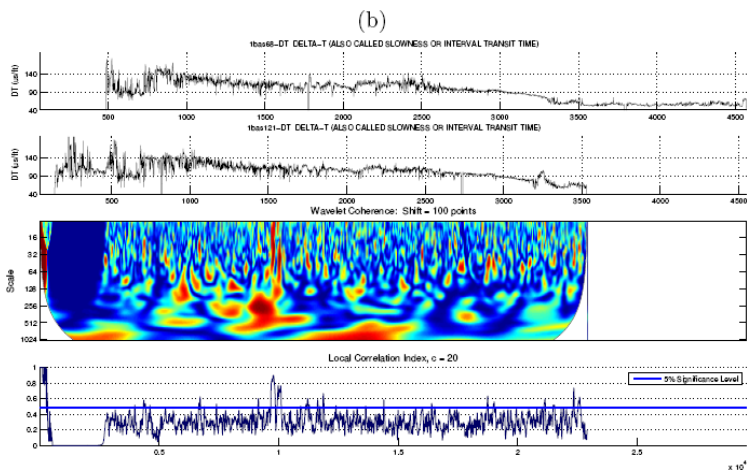
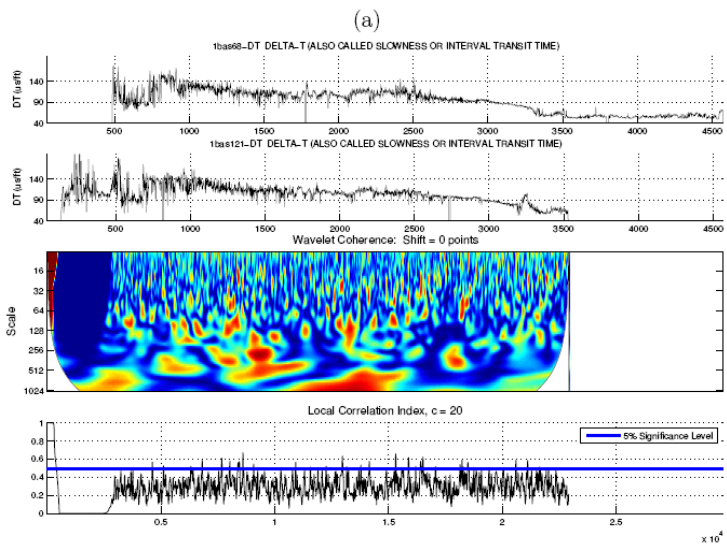
$$XWT_{f,g}(s, a) = Wf(s, a) Wg^*(s, a)$$

$$WTC_{f,g}(s, a) = \frac{(S(s^{-1} | XWT_{f,g}(s, a) |))^2}{S(s^{-1} | Wf(s, a) |^2) S(s^{-1} | Wg(s, a) |^2)}$$

$WTC_{f,g}$ gives really a measure of the COHERENCE between f and g !

“cross wavelet correlation” between the sonic well logs from 1 BAS 68 and 1 BAS 121 wells





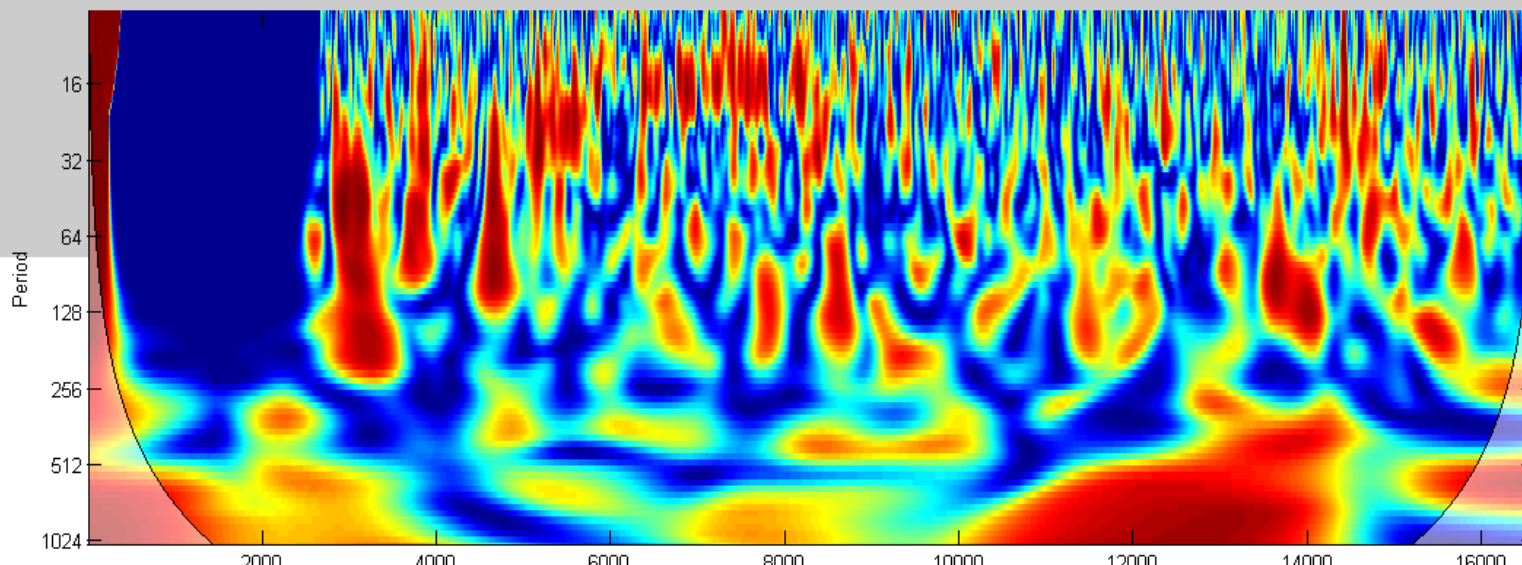
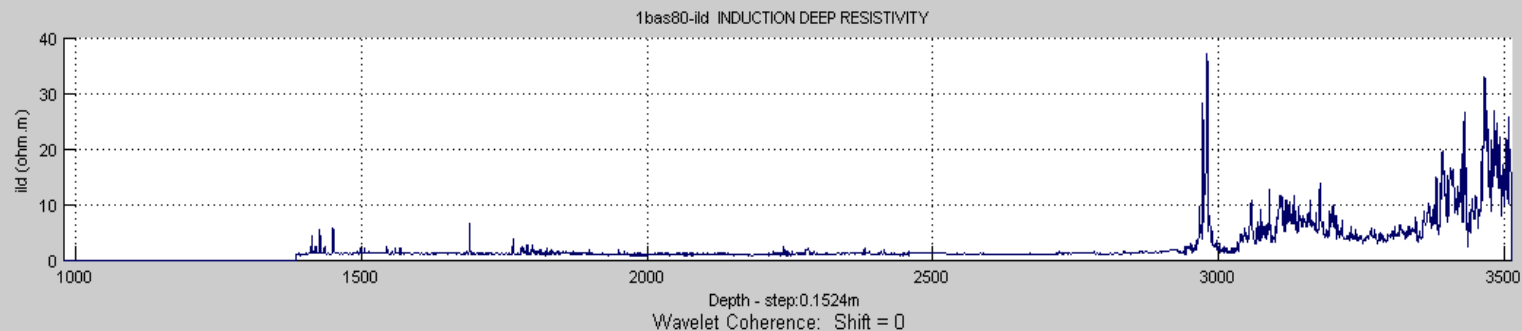
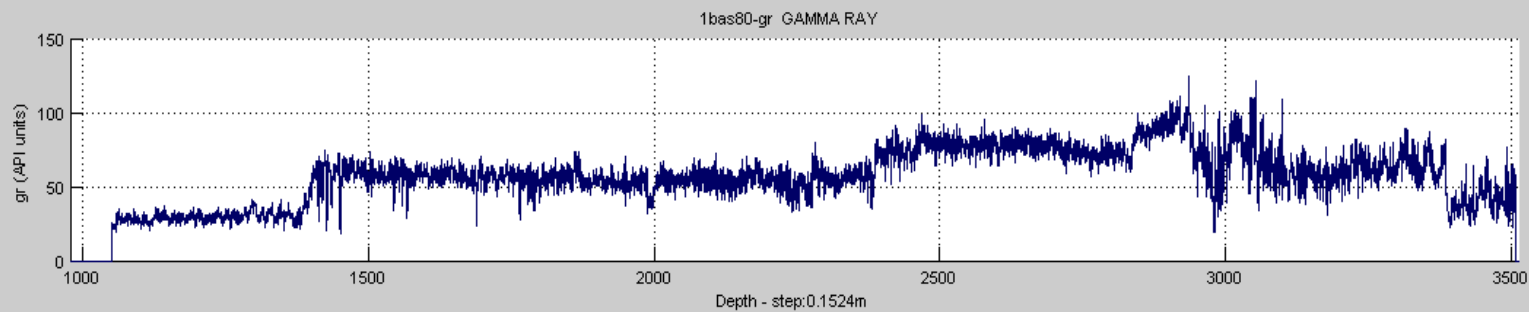
Porque o método da correlação cruzada no espaço das wavelets é mais confiável ?

- Permite computar, visualizar e comparar os coeficientes de correlação em intervalos variáveis de comprimentos de onda e em vizinhanças de larguras também variáveis ao redor de pontos em diferentes posições
- Possibilita verificar se existem correlações entre perfis, em que pontos, e em que escalas. Quando há uma coincidência total, a similaridade é perfeita.
- Serve como uma **impressão digital espectral** para identificar de uma forma abrangente as correlações ou similaridades entre estruturas geológicas.

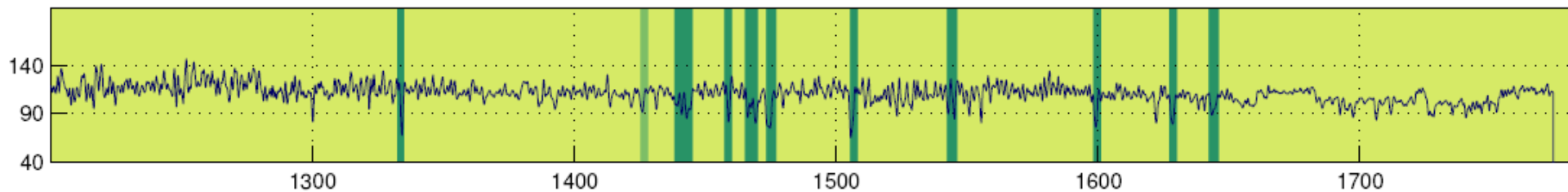
Analogia

- O teste do DNA permite identificar com precisão dois indivíduos com características genéticas semelhantes. É uma correlação feita numa sequência de valores ou de códigos em **1 dimensão**.
- O método da correlação cruzada no espaço das wavelets é ainda mais preciso porque exige a coincidência em **duas dimensões** (escala e posição).

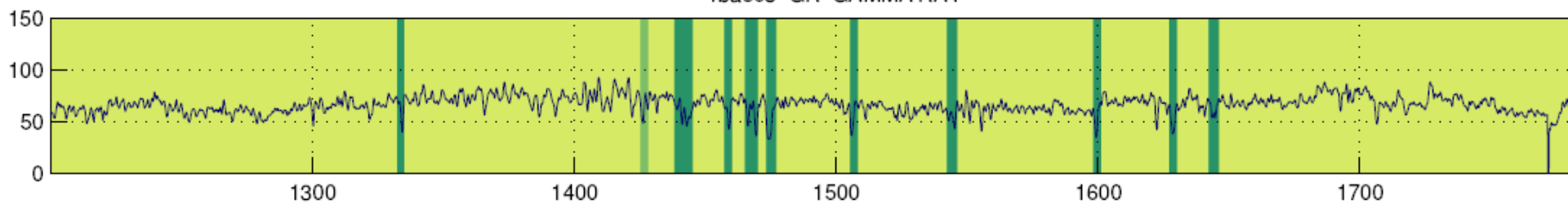
Correlação cruzada entre grandezas diferentes no mesmo poço



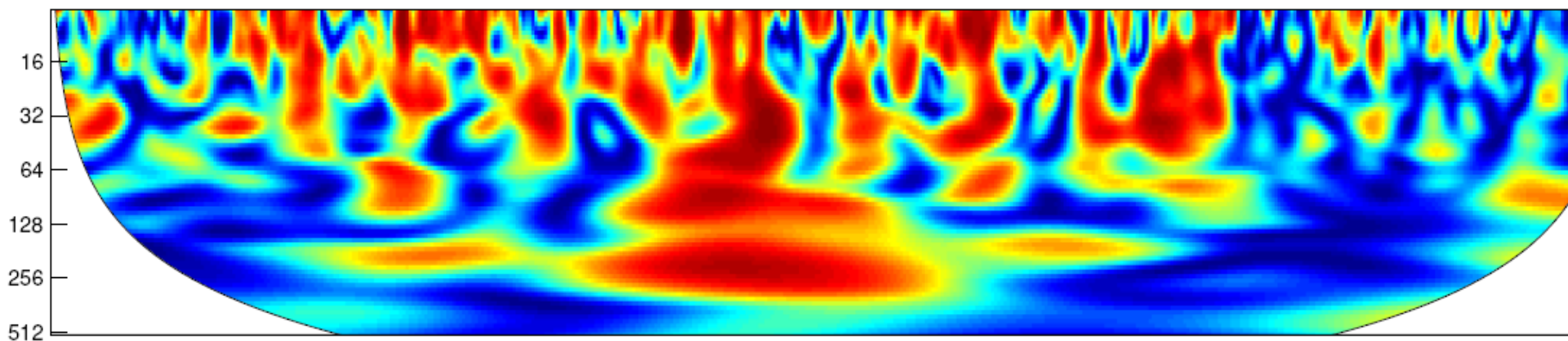
1bas68-DT DELTA-T (ALSO CALLED SLOWNESS OR INTERVAL TRANSIT TIME)



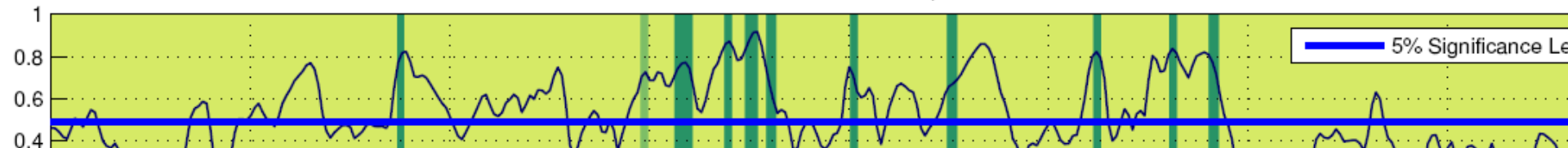
1bas68-GR GAMMA RAY



Wavelet Coherence: Shift = 0 points



Local Correlation Index, $c = 20$



Conclusions

- The possibility of analysing simultaneously the correlations between well logs for different depths and different scales increases the degree of reliability in the identification that 2 distinct wells pass through the same oil reservoir.
- This method allows to improve the characterization of the geological structures.
- It makes possible a more criterious study of the horizontal continuity of the transition interfaces between the geological layers.
- Analysing the wavelet, coherence between different physical quantities, in the same well it is possible to predict the lithology around a given well and to discover subsurface regions compatible with the occurrence of hydrocarbons.

Forever young



Long Life to Constantino !



Thank You !

Representações espectrais e correlações em sistemas complexos

- Utilizamos representações espectrais para descrever e caracterizar sistemas complexos. Em particular analisamos esses sistemas em diferentes escalas do tempo e do espaço com o emprego da "Transformada Wavelet" e também em diferentes escalas angulares com a "transformada curvelet". Isto permite estudar correlações cruzadas simultaneamente em várias escalas e a mensuração mais precisa da similaridade entre sistemas complexos.

Desvantagem das Wavelets

- A transformada wavelet dá bons resultados em funções ou dados unidimensionais
- Quando aplicada a objetos **bi** e **tridimensionais**, a transformada wavelet **não** preserva os ângulos
- Há então necessidade de generalizar este conceito para incorporar o caráter direcional

Curvelets

Candès e Donoho 1999-2004

Nova transformação em pirâmide

- Multi-escala
- Multi-orientação
- Escalonamento parabólico (anisotropia)

$$\textit{largura} \approx \textit{comprimento}^2$$

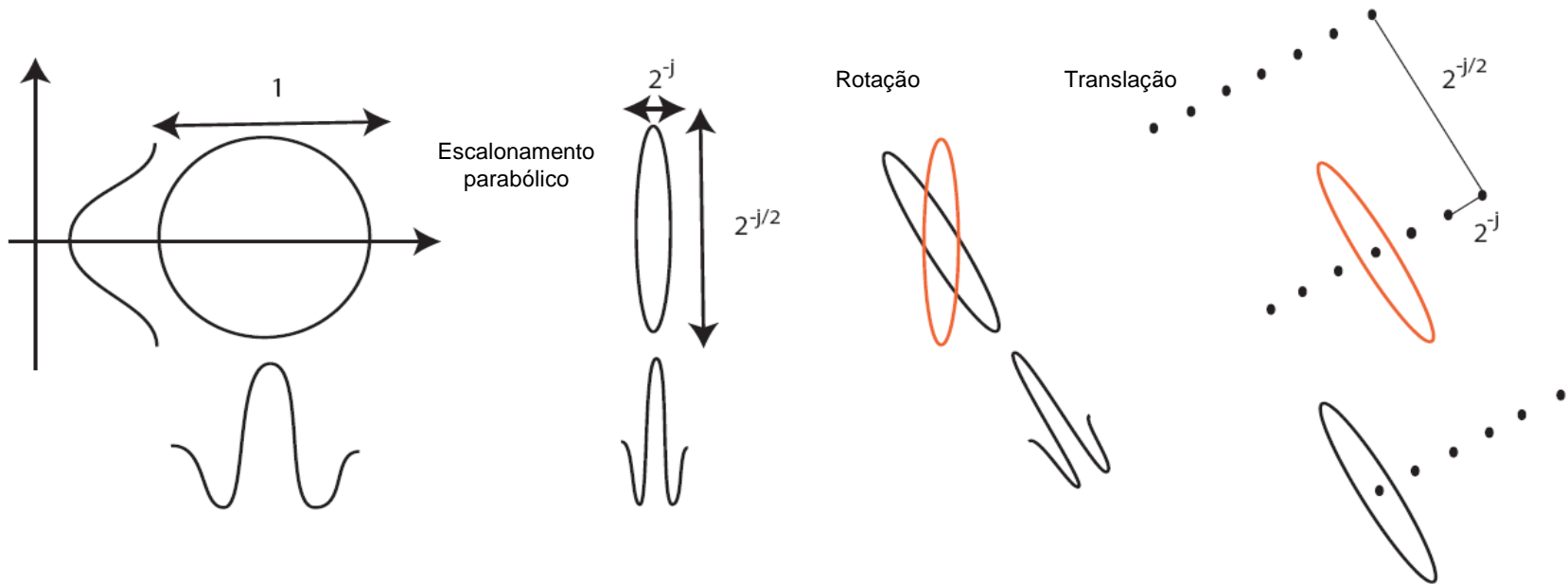
Curvelets

Podemos pensar nas Curvelets como obtidas através da aplicação de dilatações, rotações e translações a uma função de forma específica ψ

$$\Psi_{a,b,\theta}(x) = a^{-3/4} \psi(D_a R_\theta(x - b)),$$

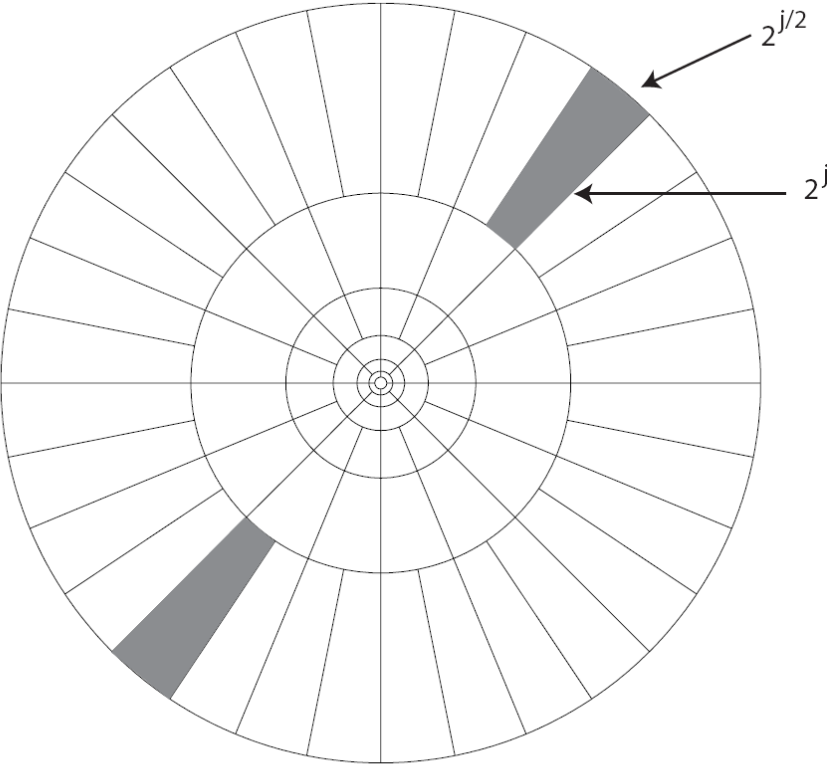
$$D_a = \begin{pmatrix} 1/a & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{a} \end{pmatrix}.$$

Curvelets: escala, localização e orientação

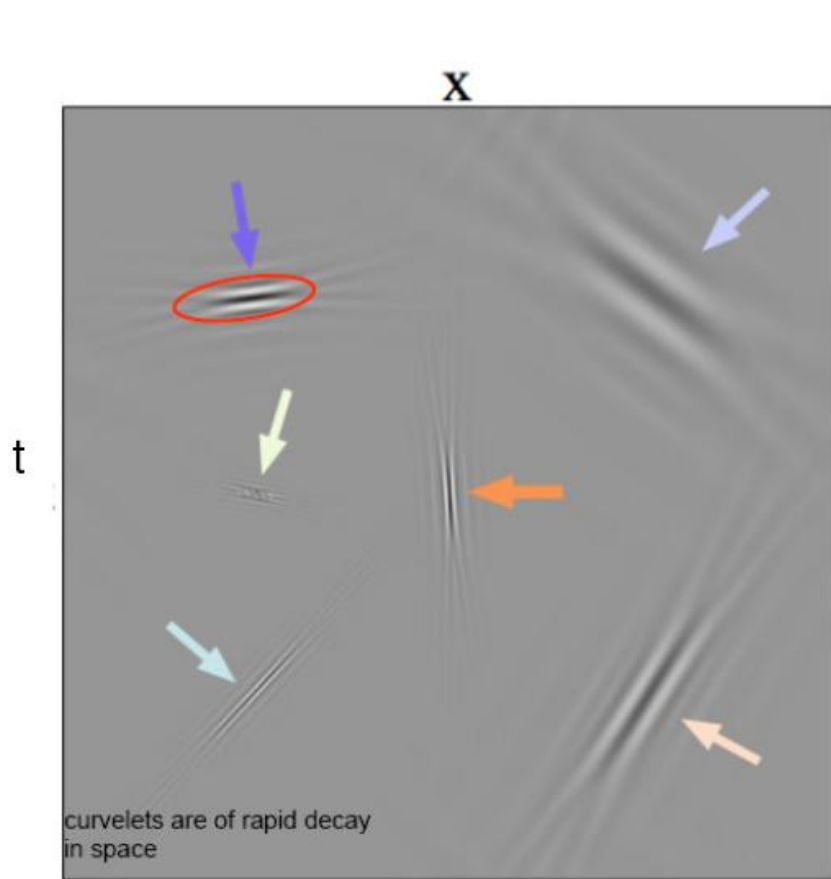


As curvelets são parametrizadas pela escala, posição e orientação

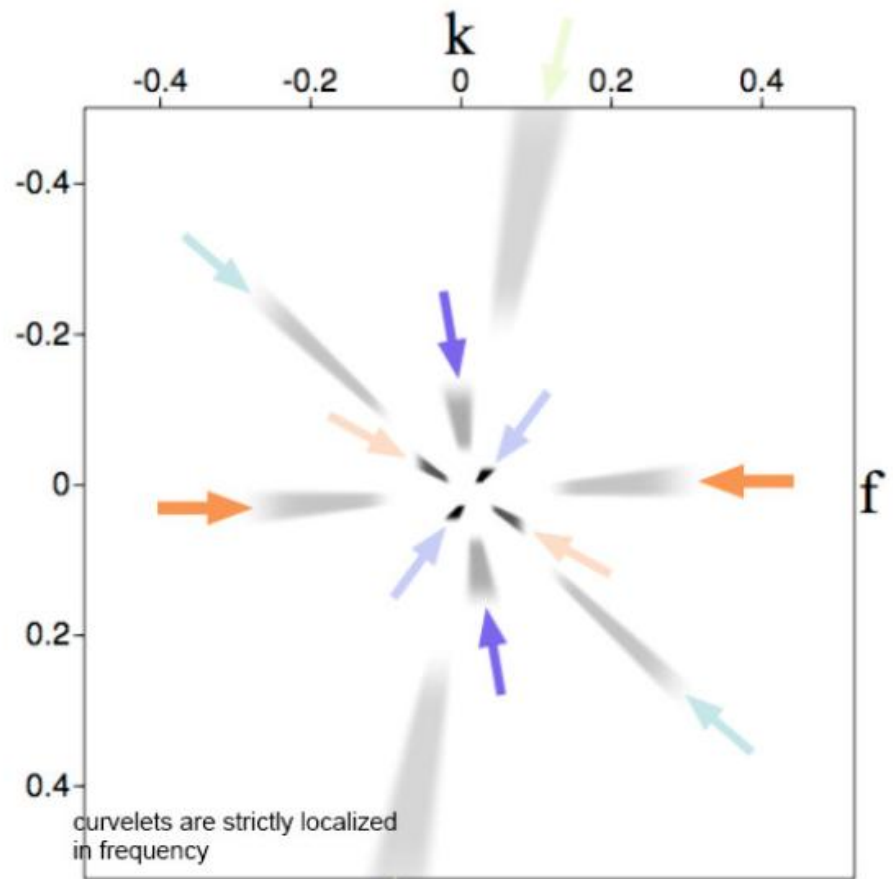
Enladrilhamento por curvelets



Curvelets em 2D

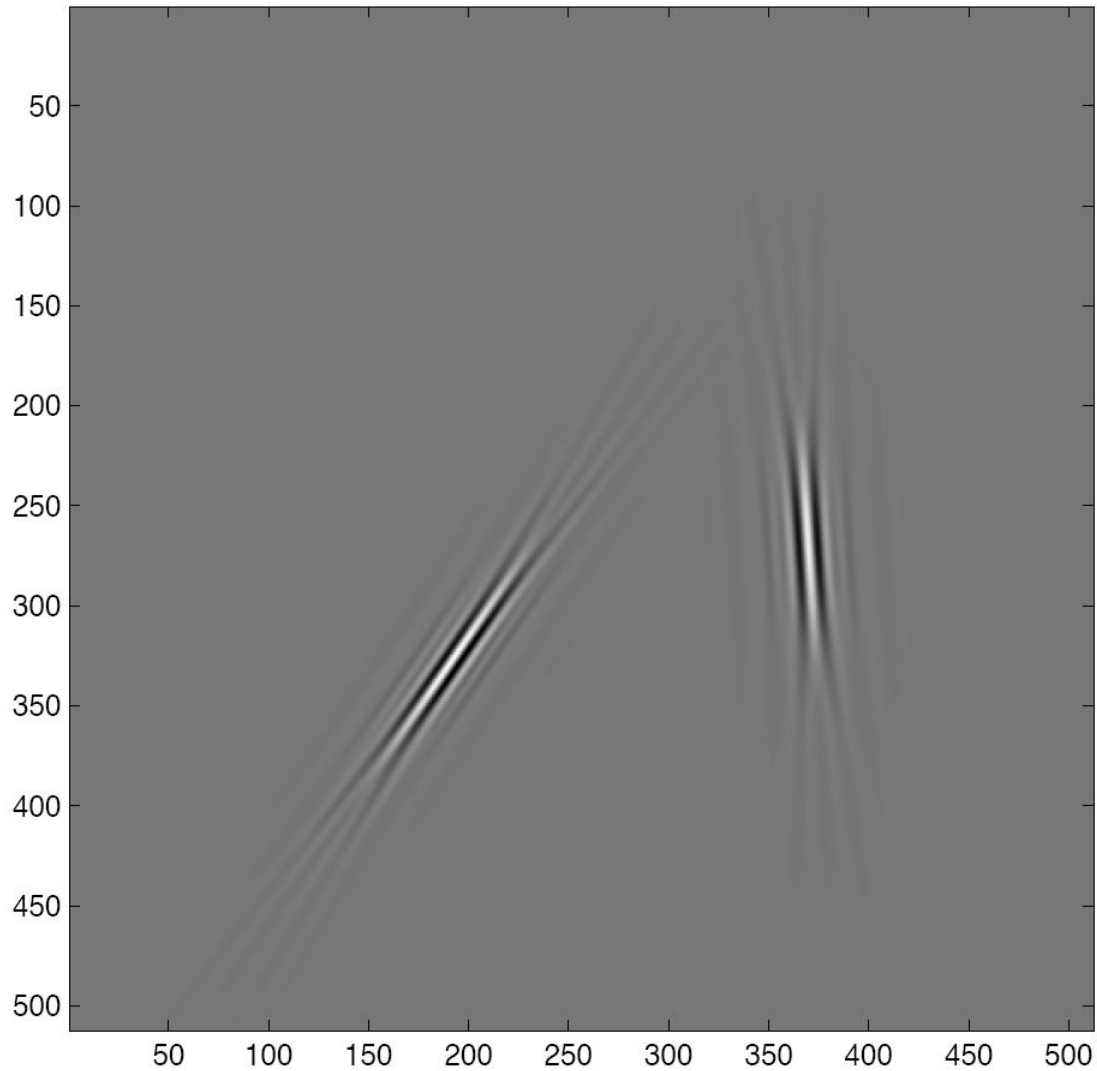


domínio $t - x$



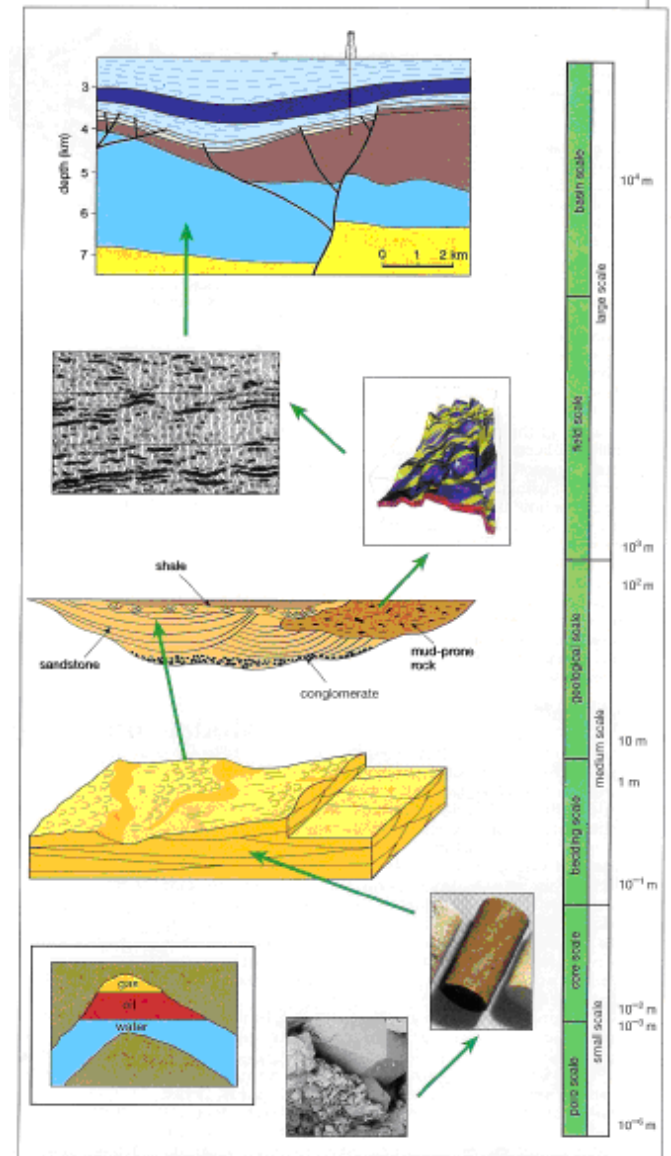
domínio $f - k$ (Fourier)

Curvelets digitaux



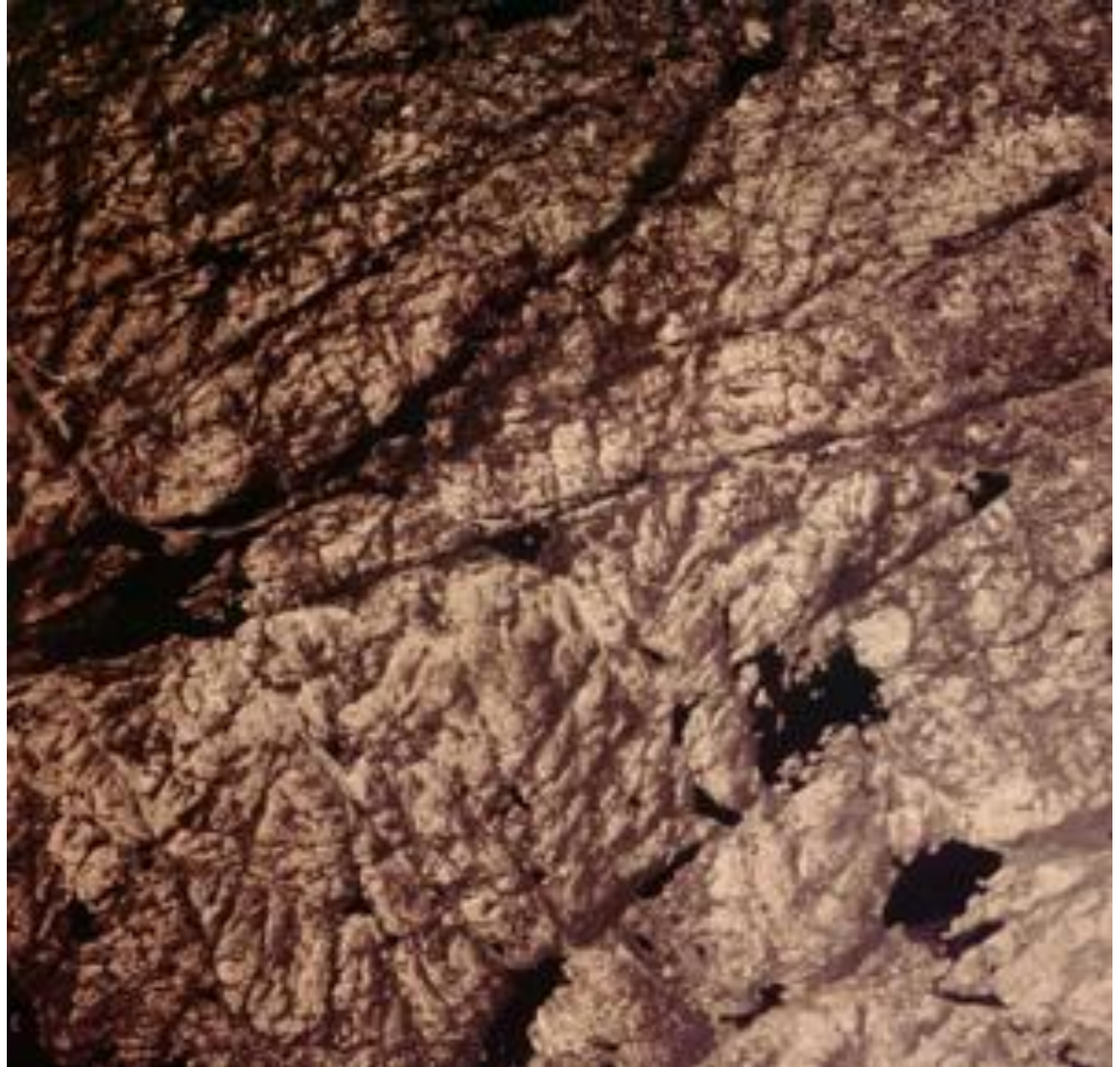
Reservatórios de Petróleo

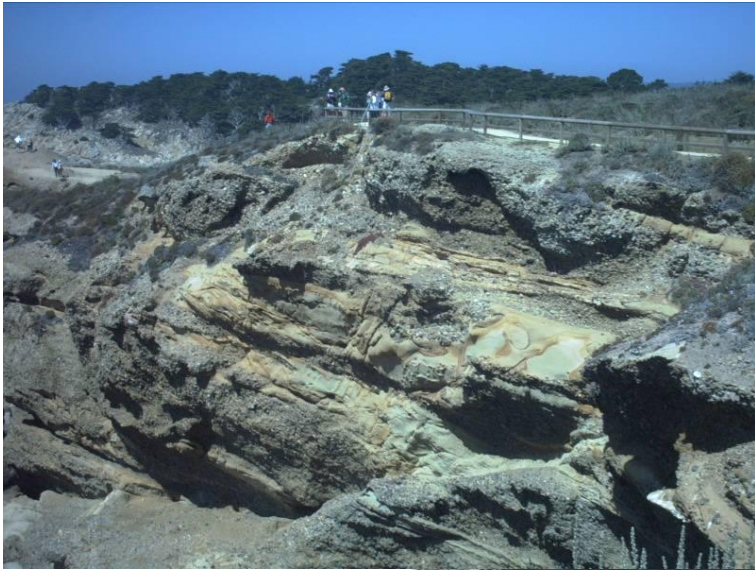
- Heterogeneidades em todas as escalas
- Comportamento Muito Complexo









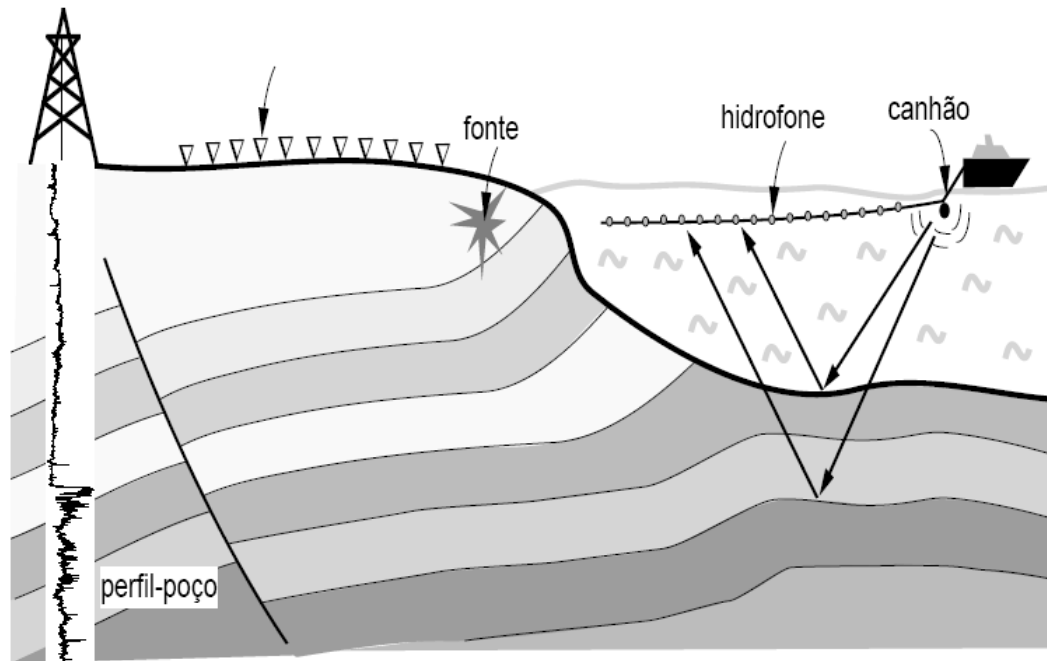


10m

1cm



Petroleum Exploration



Representações para dados sísmicos

Transformada	Hipótese subjacente
FK (Fourier)	Ondas planas
Radon (Linear / Parabólica)	Eventos Lineares / Parabólicos
Wavelet	Eventos pontuais (singularidades 1D)
Curvelet	Eventos em curvas (singularidades 2D)

Propriedades da Transformada Curvelet

Multi-escala: ladrilhamento do domínio FK em coroas diádicas em coroas diádicas

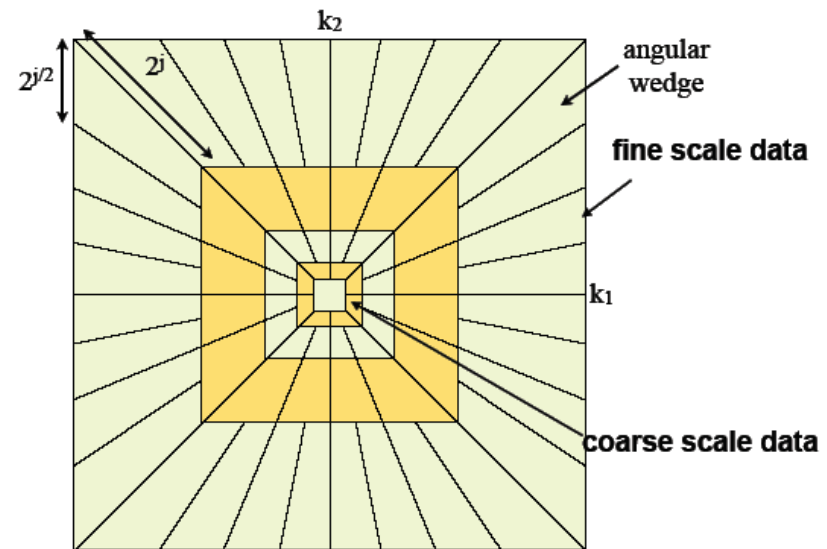
Multi-direcional: coroas subdivididas em intervalos angulares; n° de ângulos dobra em cada escala

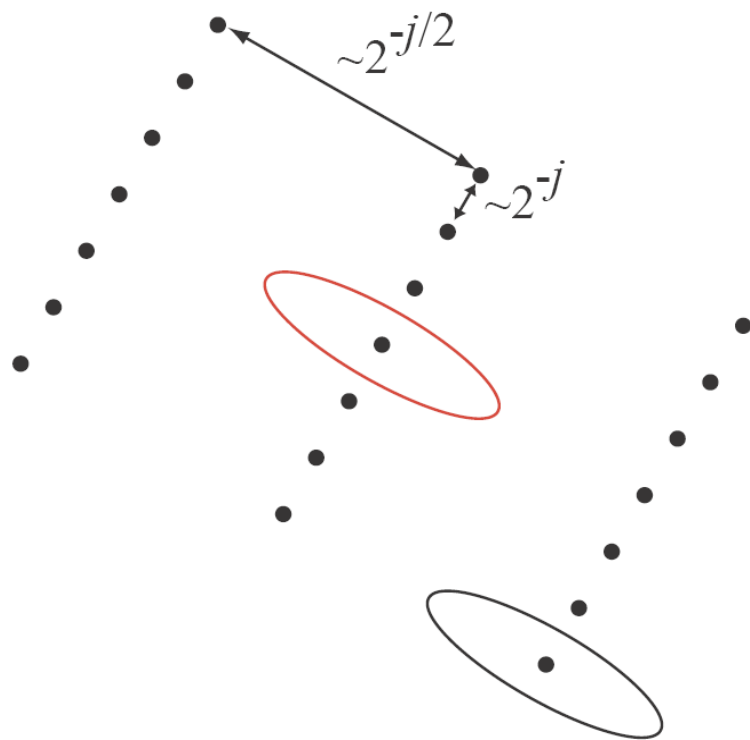
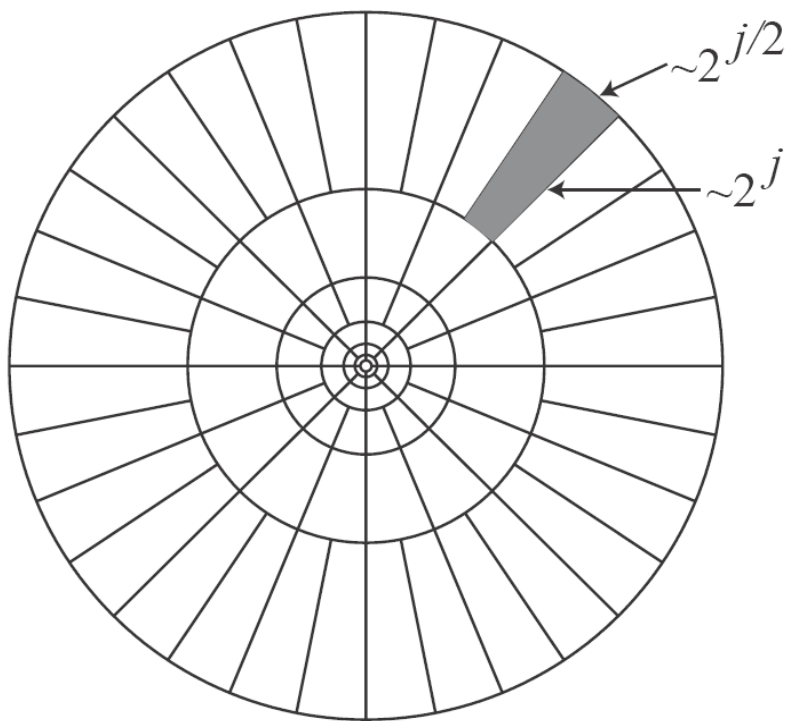
Anisotrópica: escalonamento parabólico

Decaimento rápido no espaço

Localização estrita no espaço de Fourier

“Frame” com redundância moderada





Como expandir uma função numa base wavelet discreta

Funções de escala

coeficientes

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f, \varphi_{J,k} \rangle \varphi_{J,k}(x) + \sum_{j \geq J} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \langle f, \psi_{j,k} \rangle \psi_{j,k}(x)$$

Aproximação na
escala J

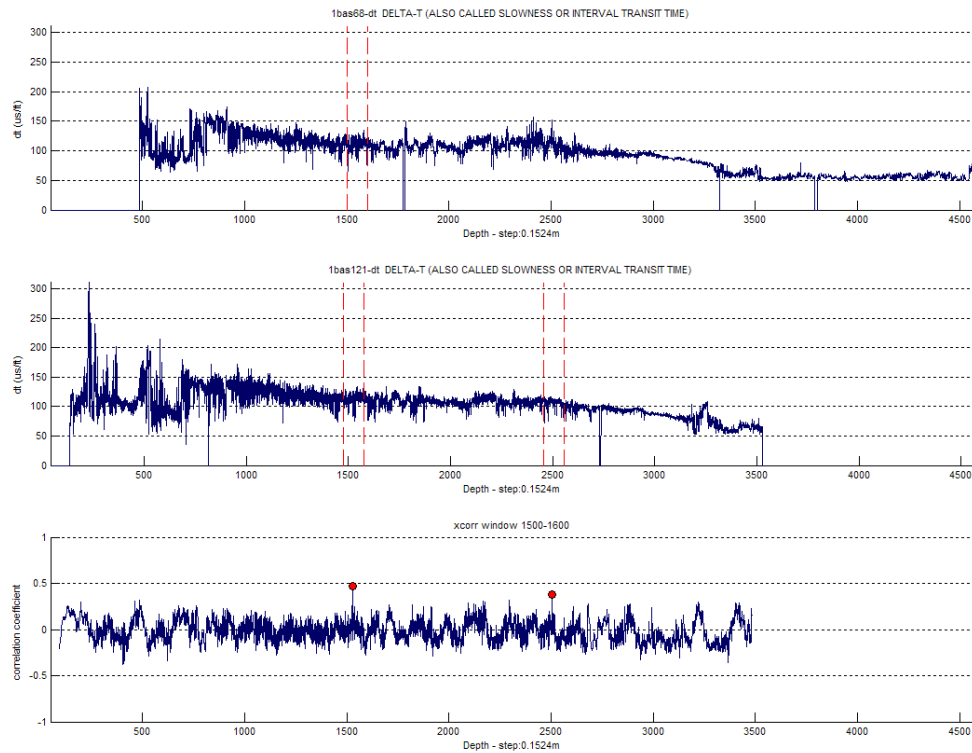
Wavelets

coeficientes

Soma dos detalhes
nas escalas j

Correlação cruzada padrão entre perfis usando janelas deslizantes

[data brushing](#)



Resultados da correlação cruzada janelada

- Muitos máximos de correlação
- A identificação de estruturas análogas não é unívoca
- Os resultados não são conclusivos

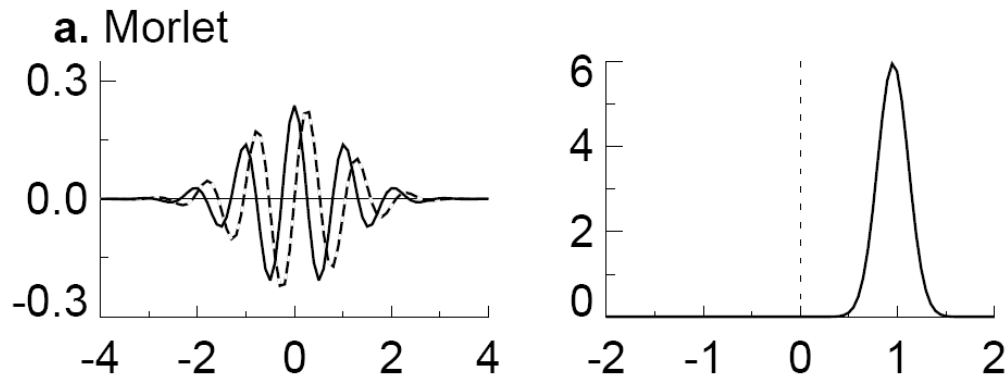
Transformada em Ondaletas

$$Wf(s, a) = \langle f, \psi_{s,a} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{s,a}^* dx,$$

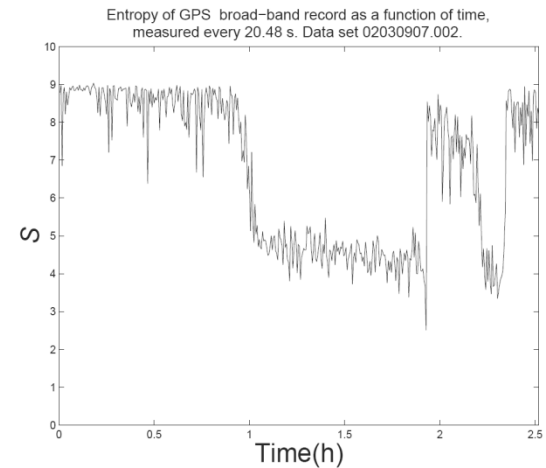
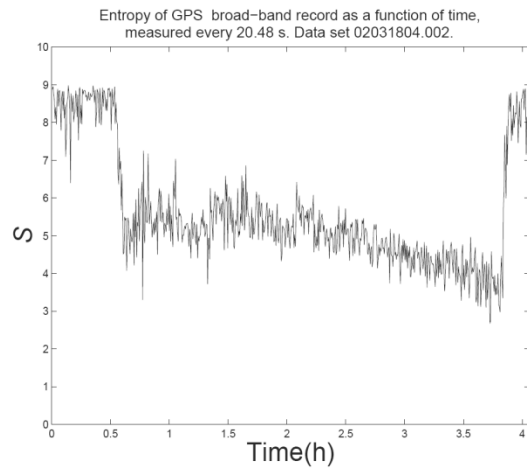
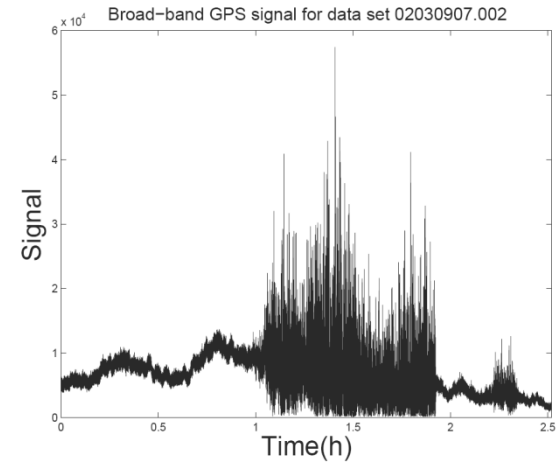
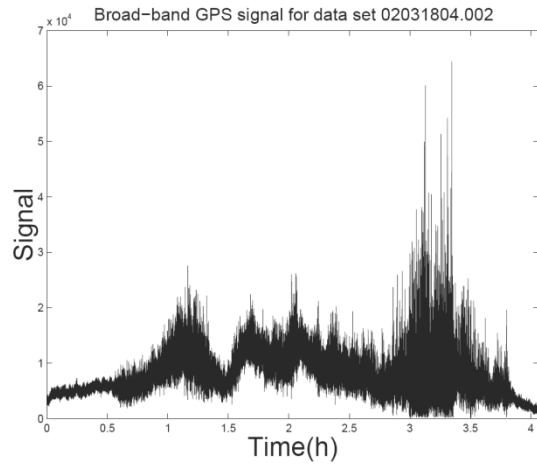
$$\psi_{s,a}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-a}{s}\right)$$

Ondaleta de Morlet

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2}$$



Um Paradoxo ?

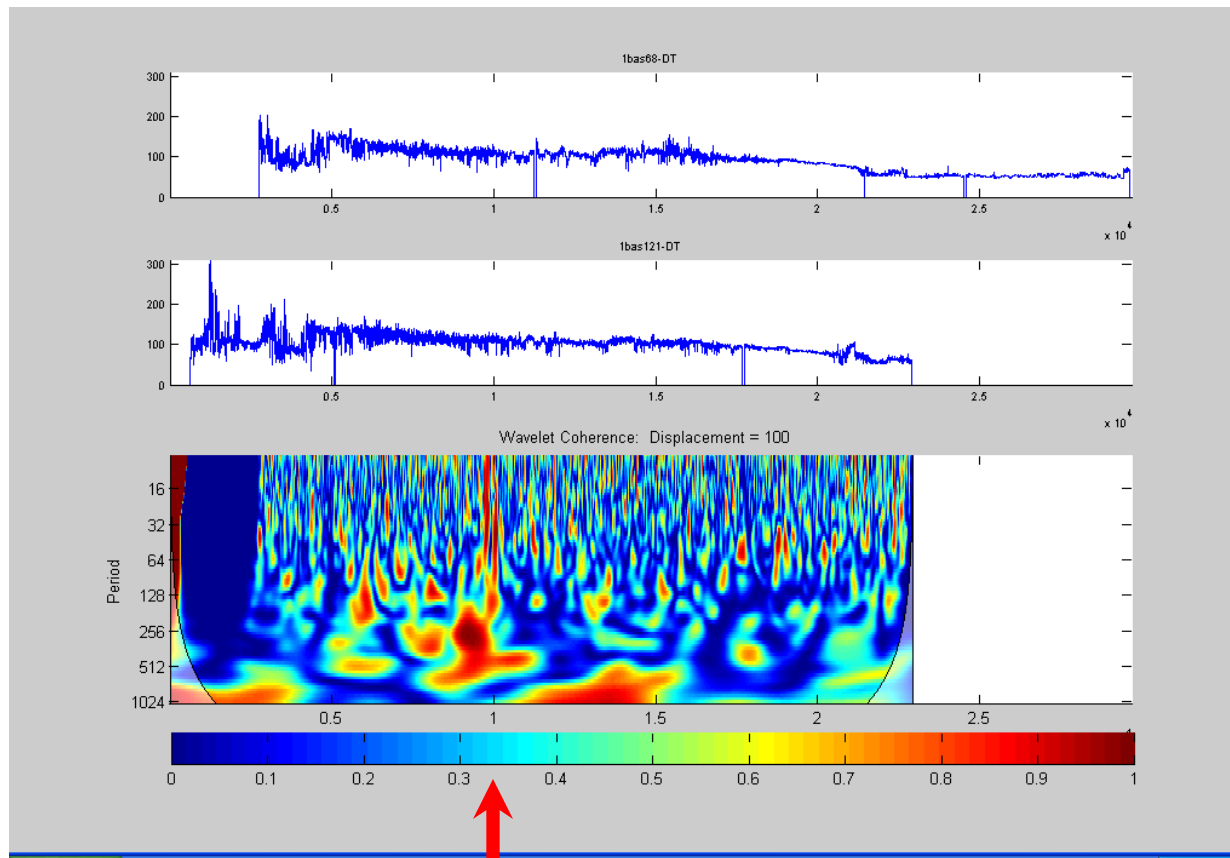


Correlação cruzada no espaço das ondaletas

$$XWT_{f,g}(s,a) = Wf(s,a) Wg^*(s,a)$$

$$WTC_{f,g}(s,a) = \frac{(S(s^{-1} | XWT_{f,g}(s,a) |))^2}{S(s^{-1} | Wf(s,a) |^2) S(s^{-1} | Wg(s,a) |^2)}$$

“cross wavelet correlation” entre os perfis sônicos de 1BAS68 e 1BAS121



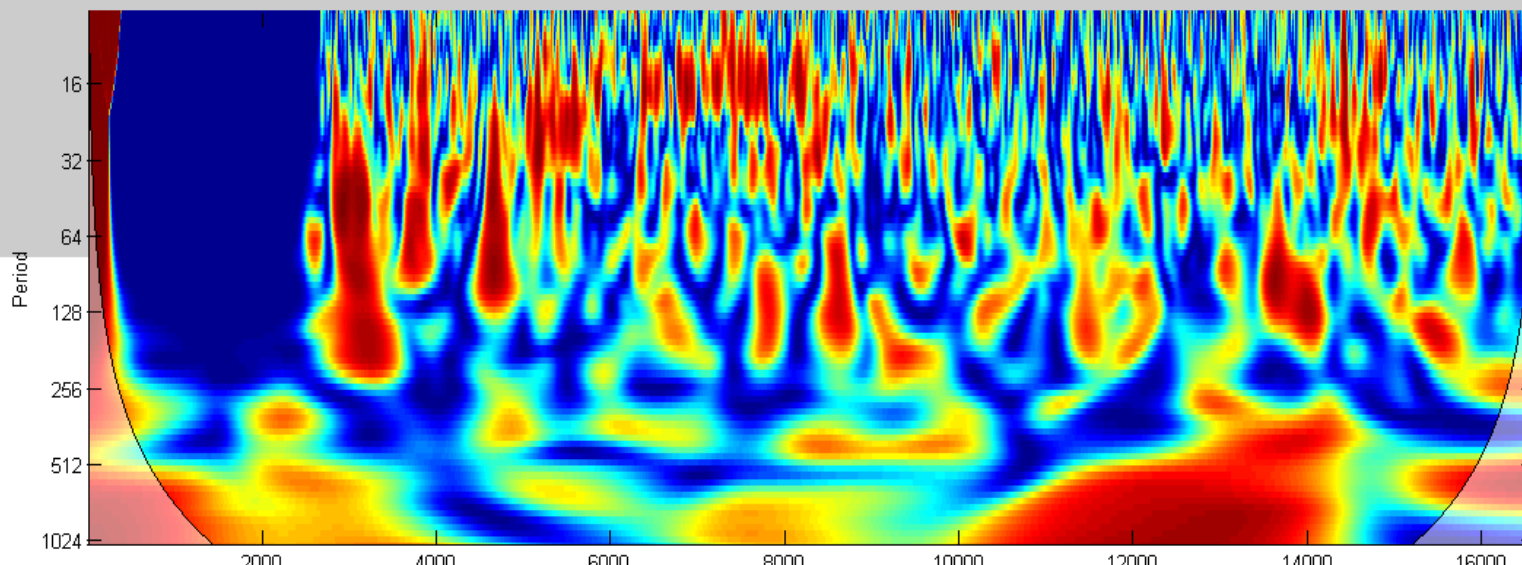
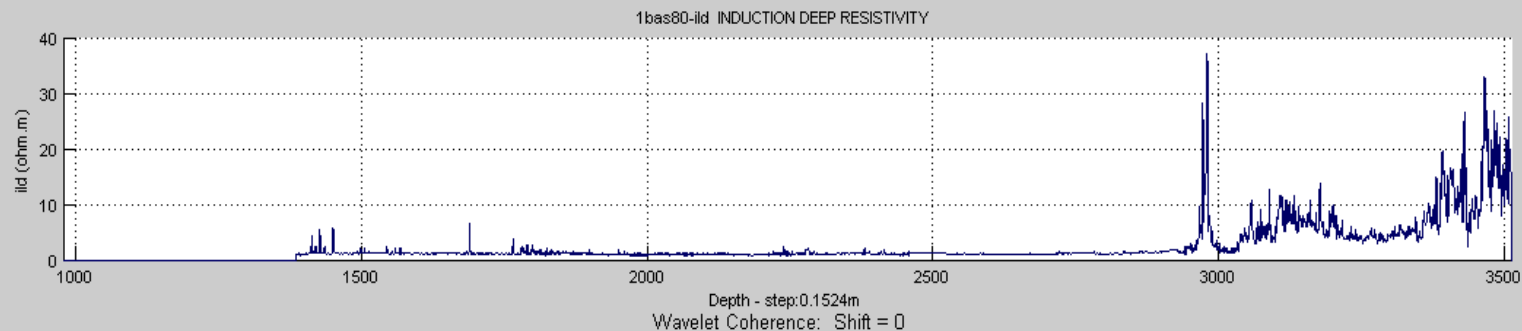
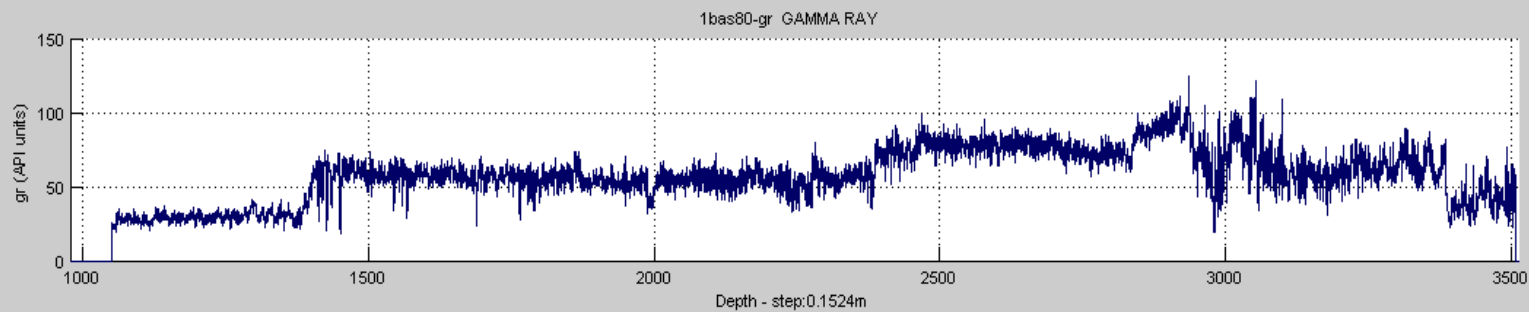
Porque o método da correlação cruzada no espaço das wavelets é mais confiável ?

- Permite computar, visualizar e comparar os coeficientes de correlação em intervalos variáveis de comprimentos de onda e em vizinhanças de larguras também variáveis ao redor de pontos em diferentes posições
- Possibilita verificar se existem correlações entre perfis, em que pontos, e em que escalas. Quando há uma coincidência total, a similaridade é perfeita.
- Serve como uma **impressão digital espectral** para identificar de uma forma abrangente as correlações ou similaridades entre estruturas geológicas.

Analogia

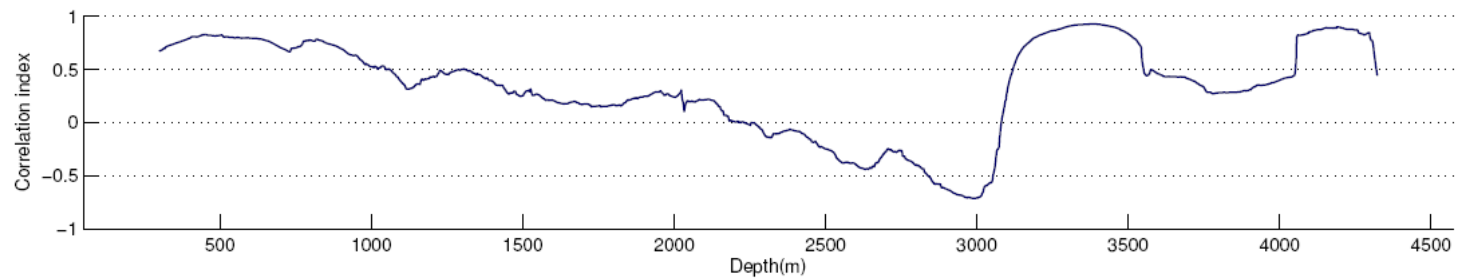
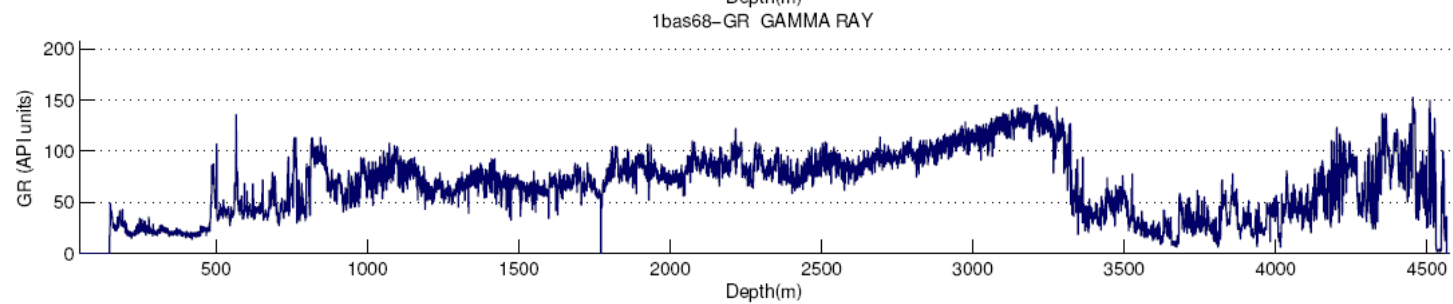
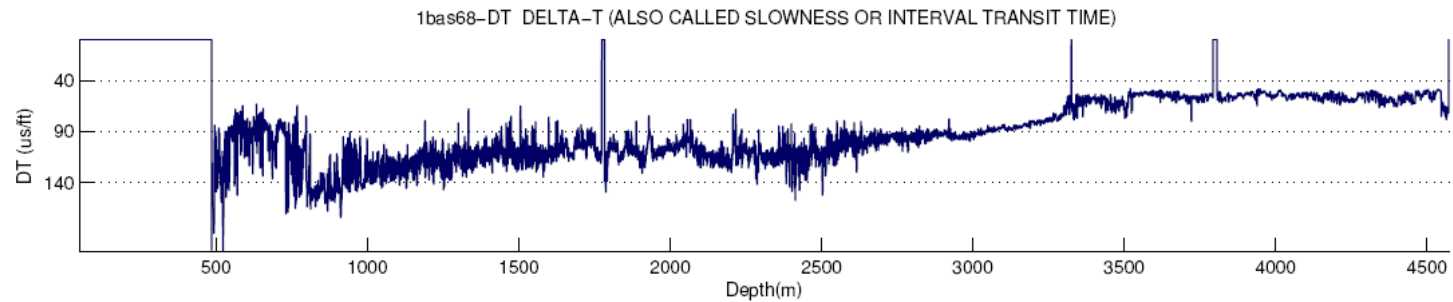
- O teste do DNA permite identificar com precisão dois indivíduos com características genéticas semelhantes. É uma correlação feita numa sequência de valores ou de códigos em **1 dimensão**.
- O método da correlação cruzada no espaço das wavelets é ainda mais preciso porque exige a coincidência em **duas dimensões** (escala e posição).

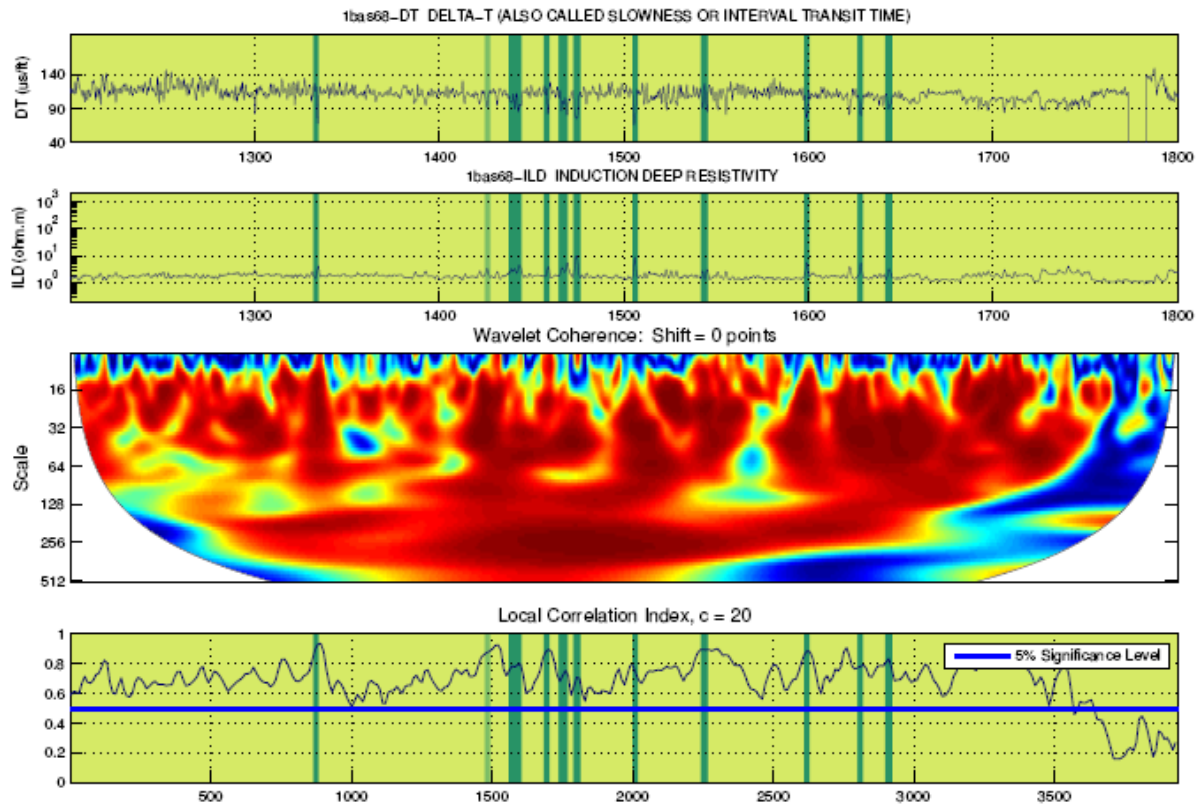
Correlação cruzada entre grandezas diferentes no mesmo poço

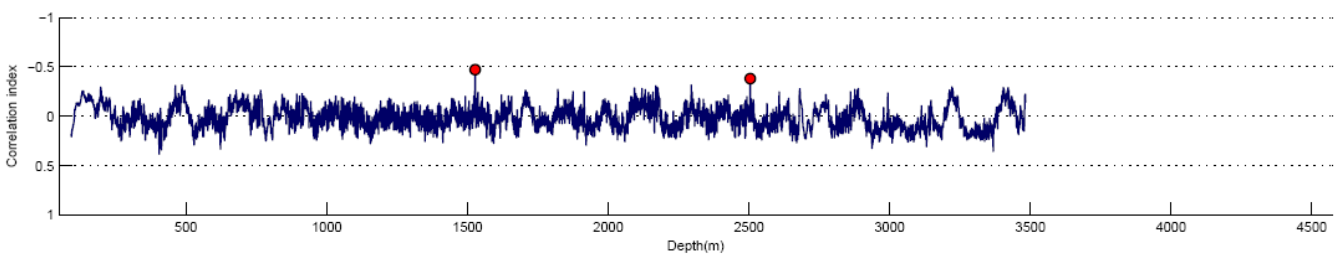
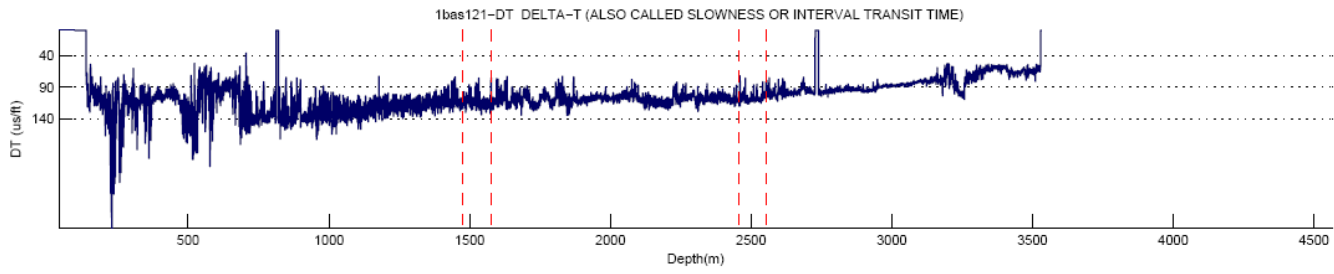
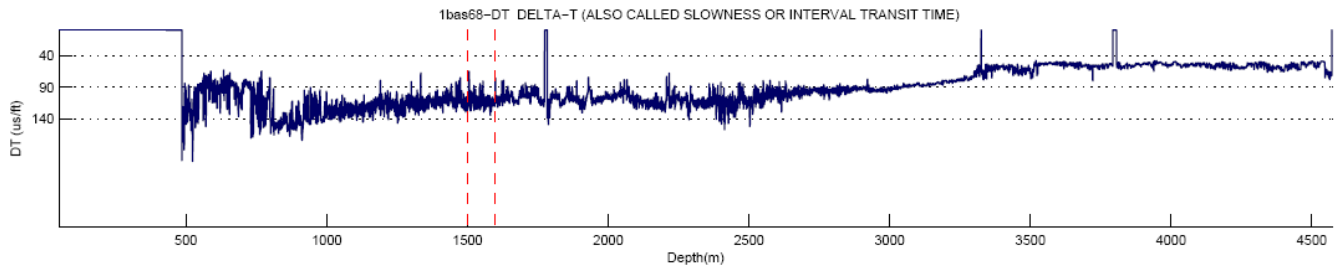


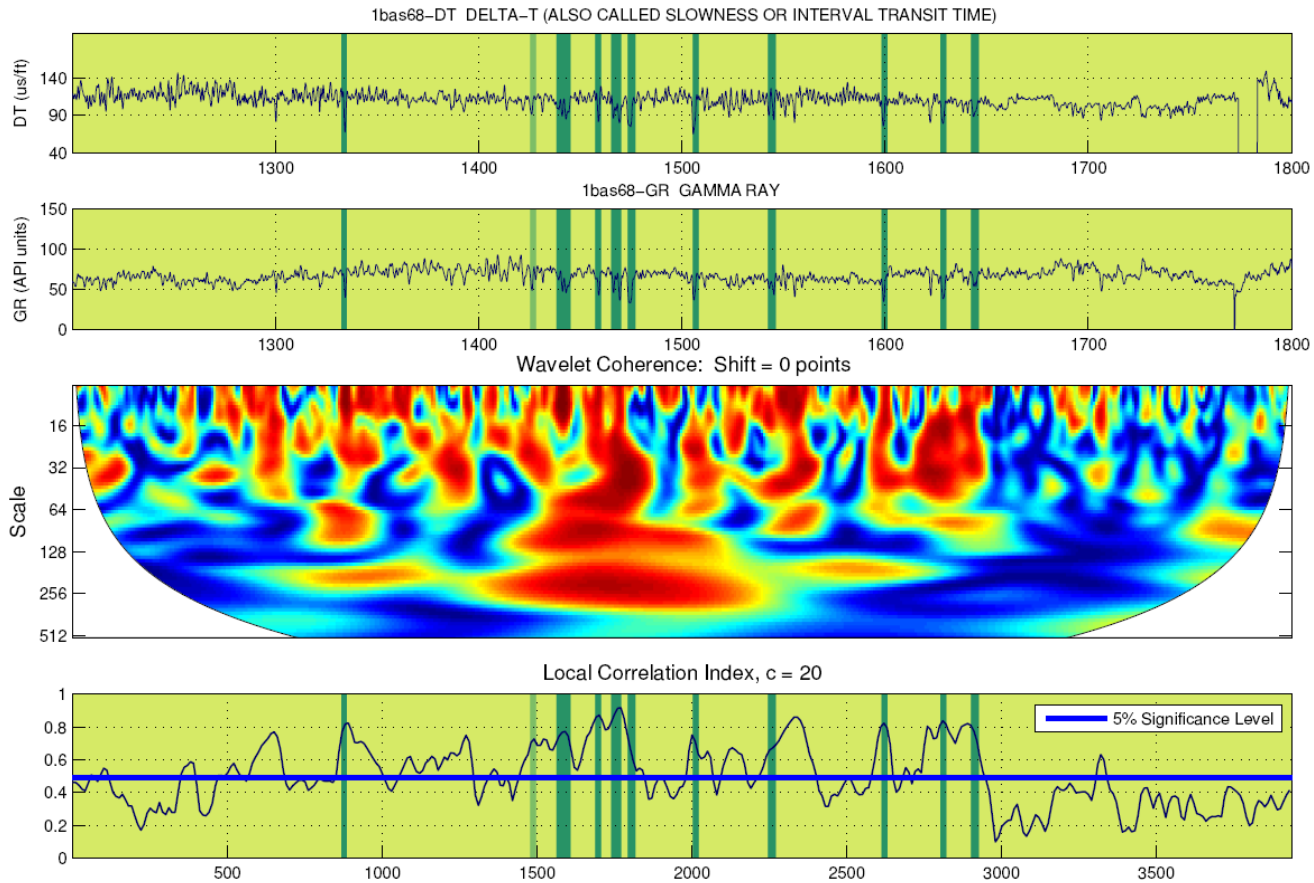
Conclusão

- A possibilidade de se observar correlações entre perfis de poços, para diferentes profundidades e em diferentes escalas, **simultaneamente**, aumenta o grau de confiabilidade na identificação de que dois poços distintos atravessam o mesmo reservatório de petróleo
- Este método permite melhorar a caracterização de estruturas geológicas
- Possibilita ainda o estudo mais criterioso da continuidade horizontal das transições entre camadas geológicas









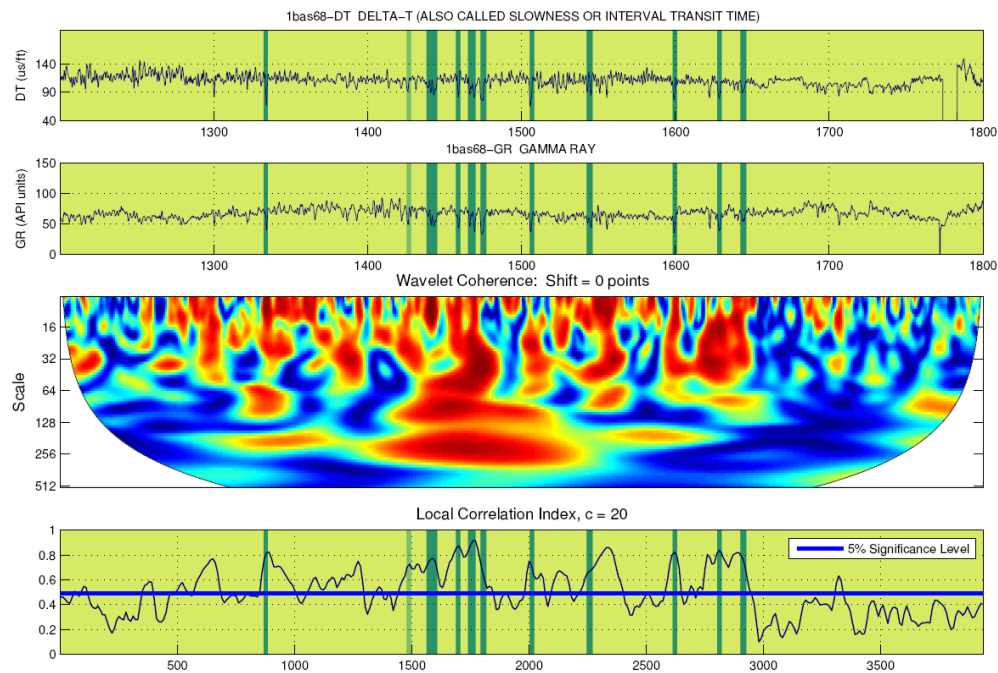


Figure 5: In panel (c), color contour plots for the wavelet coherence coefficient (WCC) between the DT (panel (a)) and GR (panel (b)) logs of the I-BAS-68-BA well. Large (small) values of the coefficients are indicated by red (blue). In panel (d) the local correlation index as defined in Eq.(10). The 5% significance level is represented by the blue line.

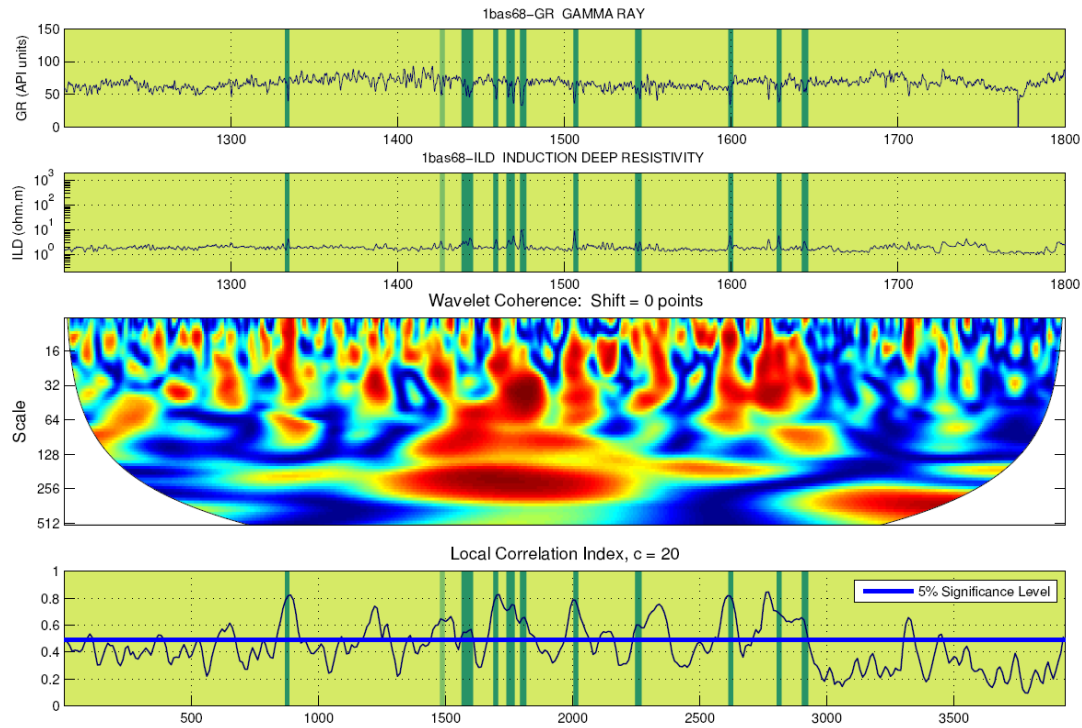


Figure 7: In panel (c), color contour plots for WCC between the GR (panel (a)) and ILD (panel (b)) logs of the I-BAS-68-BA well. Color code is the same as in Fig. ???. In panel (d) the local correlation index as defined in Eq.(10). The 5% significance level is represented by the blue line.

Wavelets Prós

- Operação automática de Destendenciamento
- Fundamentação Matemática forte
- Escalonamento (scaling) e Renormalização podem ser feitos numa maneira natural
- Podemos escolher diferentes bases
- Análise em **Tempo** e **Frequência**
- A Transformada Wavelet Discreta é mais rápida que a de Fourier

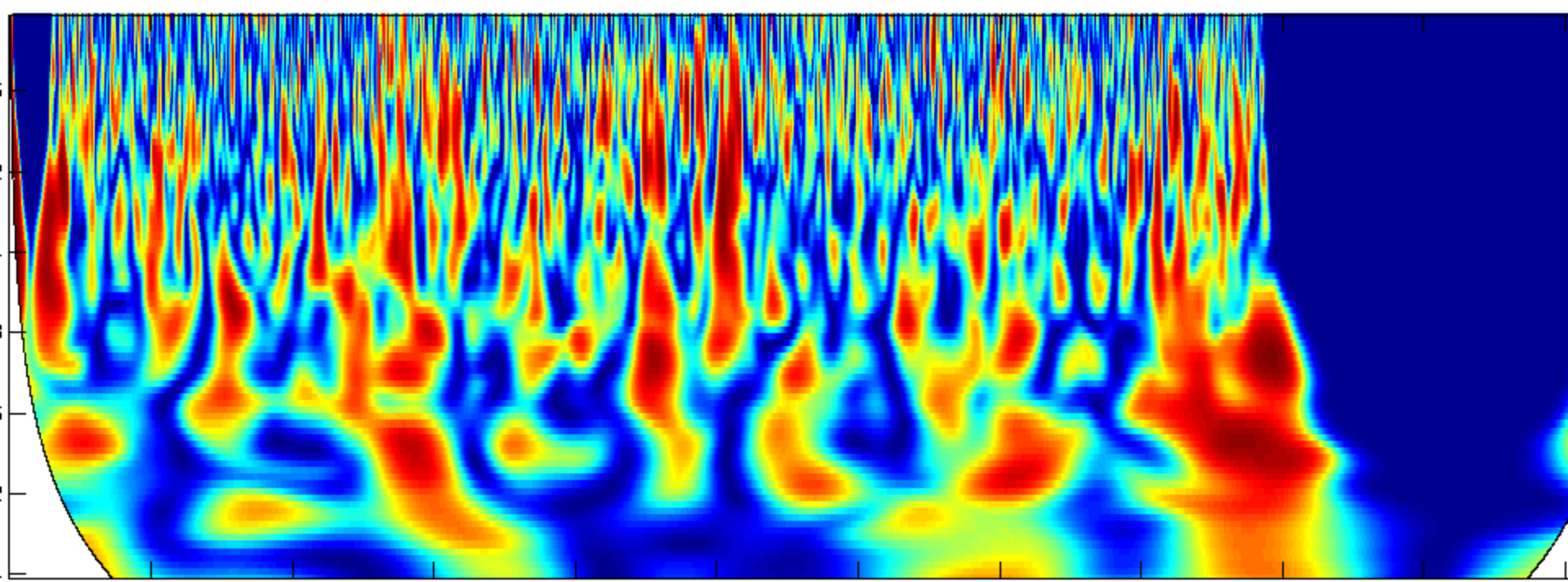
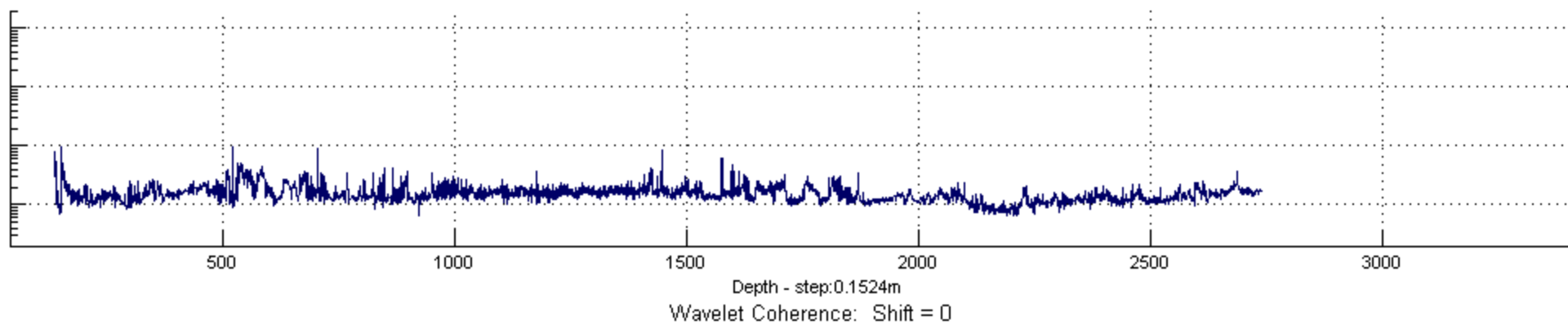
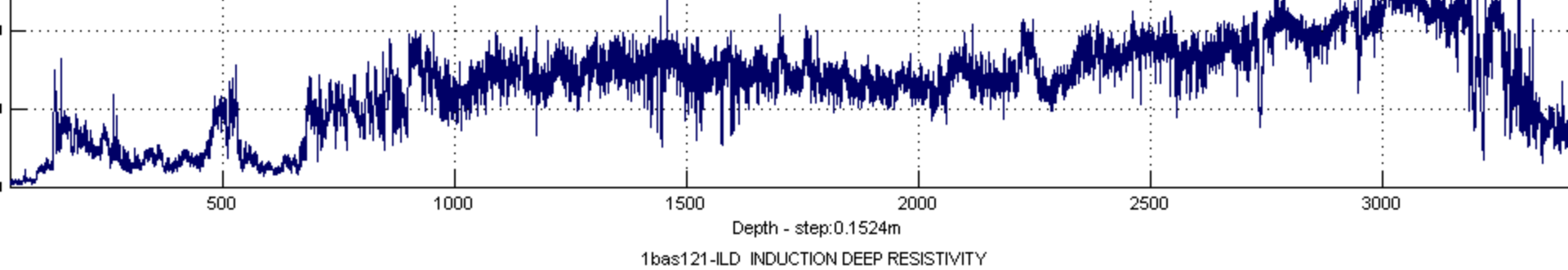
Dados de Sistemas Complexos

- Não Estacionários
- Grandes Flutuações
- Aleatoriedade

[11/11/09 - 09h15 - Sala Xingú]

Estudo de correlações cruzadas em perfis de poços com utilização de transformada de ondaletas, M. V. C. HENRIQUES, L. S. LUCENA, *Departamento de Física Teórica e Experimental e Centro Internacional de Sistemas Complexos, Universidade Federal do RioGrande do Norte*, R. F. S. ANDRADE, *Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia*, J. S. ANDRADE JR., *Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará*, M. LUCENA-NETO, *Petrobras* ■

Neste trabalho nós apresentamos uma análise de dados físicos obtidos em poços de petróleo baseada na técnica de correlações cruzadas das transformadas de ondaletas. Tais análises proporcionam um melhor entendimento da estrutura do reservatório. Buscamos encontrar uma resposta consistente a diversas questões tais como: (a) Quais atributos são correlacionados, em que profundidade e em que escala? (b) Como a correlação varia com a distância entre poços? (c) Como este método serve para averiguar a continuidade e extensão dos reservatórios e camadas? Nossos resultados fazem uso da transformada ondaleta contínua. Nossas medidas levam em conta: a) atributos distintos no mesmo poço b) atributos idênticos em poços distintos c) atributos do tipo (a) e (b) com deslocamento vertical. Consideramos dados para 4 poços da bacia do Jequitinhonha. Esta é uma área de quebra de talude, na qual a perfuração de poços é particularmente difícil. A identificação de continuidade do reservatório tem significado relevante pois possibilitaria a utilização dos dados colhidos em terra, que são muito mais numerosos. Os resultados mostram que a técnica da transformada de ondaleta cruzada oferece uma resposta consistente a esta questão. Identificamos como as interfaces entre camadas geológicas variam espacialmente, sugerindo a ocorrência de deslocamentos verticais. A possibilidade de se observar correlações em diferentes escalas aumenta o grau de confiabilidade na identificação de que dois poços distintos atingiram o mesmo reservatório. Isto se deve ao importante fato que as transformadas de ondaleta são capazes de decompor os dados primários nas mais diversas escalas de comprimento.



Desafios

- Como tratar, analisar e entender os sistemas complexos ?
- Como processar e remover o ruído de dados não-estacionários ?
- Como decompor e estudar estes dados em diferentes escalas ?
- Como achar as melhores representações para “descobrir” estruturas escondidas?