



## Estudo de análogos de reservatório na Bacia de Resende (Brazil) com dados de GPR e modelagem FDTD.

Gleide A. N. Dias\*, IGEO/UFRJ, Paula F. da Rocha IGEO/UFRJ, Guimarães, M., PETROBRAS S/A e Jadir C. da Silva, IGEO/UFRJ, Brazil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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

Levantamentos de dados de Radar de Penetração no Solo (GPR) foram realizados em um afloramento próximo à seção de rádio Agulhas Negras no município de Resende, Rio de Janeiro, Brasil, para contribuir no estudo de análogos de reservatórios.

Os dados de GPR foram adquiridos no modo de reflexão simples, com antena de 100 MHz. Sendo os parâmetros de velocidade para a migração FK 2D obtidos com um algoritmo baseado no método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) simulando a polarização, geometria e parâmetros constitutivos (permissividade dielétrica e condutividade elétrica). A velocidade usada para o cálculo da migração foi obtida através de modelagem numérica.

Os dados de GPR tratados através do programa de processamento sísmico (2D/3D-4.00.a) forneceu uma maior representação das feições estruturais e litológicas do afloramento. Cujas análises das técnicas de processamento de dados sísmicos para os dados de GPR em afloramentos, vem a colaborar para o estudo de reservatórios em grandes profundidades, auxiliando em ajuste de parâmetros e verificando a eficácia dos processamentos sísmicos.

### Introdução

O radar de penetração no solo (GPR) utilizado nesta pesquisa é uma metodologia que consiste de um sistema de geração de pulsos de energia eletromagnética com altas frequências, onde o campo eletromagnético é parcialmente refletido ao incidir em uma interface que separa meios com propriedades eletromagnéticas contrastantes. Esta ferramenta já vem sendo utilizada com sucesso no estudo de alvos rasos e na geologia do petróleo para a caracterização de análogos de reservatório.

Utilizou-se o método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) para amarração do GPR com o afloramento.

A área de estudo é um afloramento com deposição sedimentar de areia e argila num corte de estrada situada na bacia de Resende, Rio de Janeiro, Brasil.

### Contexto Geológico

O afloramento em estudo está localizado na bacia de Resende a qual está inserida em um sistema de Rift continental da Serra do Mar. Esta é uma depressão alongada em ENE e situada entre as cidades de Curitiba e Rio de Janeiro. A principal via de acesso à área é a rodovia Presidente Dutra (BR-116), que atravessa a maior parte da bacia de Resende na direção E-W, entre Floriano e Engenheiro Passos.

O embasamento cristalino desta área é constituído por rochas metamórficas do Ciclo Brasileiro e do Pré-cambriano. Intrusões de diabásio também estão presentes sob forma de diques e sills, sendo comuns também à presença de rochas alcalinas sob a forma de grandes maciços principalmente entre a bacia de Resende e Tabaté (Riccomini *et al.*, 1987).

O afloramento escolhido para este estudo localiza-se próximo a seção de rádio Agulhas Negras (Fig.1) no qual segundo Ramos (2002), este é caracterizado pela associação de fácies 5 (classificação das litofácies) de um sistema fluvial meandrante, cuja associação corresponde aos depósitos arenosos com predominância das litofácies At (Arenito médio a muito grosso), Am1 (Arenito fino a médio), Pm2 (Lamito e siltito, com resto de vegetais e bioturbação.) e Pm3 (Siltito e lamito bioturbados). São escassos as litofácies Ap (Arenito médio a grosso), Ccm (Conglomerado fino a grosso com matriz arenítica) e Bi (Brecha intraformal)(Tabela 1).

### Método de Modelagem de GPR 2D

O algoritmo GPRMAX2D, utilizado neste trabalho, baseia-se no método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD).

Para facilitar o estudo de feições importantes na resposta do GPR a um alvo, Giannopoulos (2002) propõe as seguintes suposições: o meio é considerado linear e isotrópico, a antena transmissora é modelada como um dipolo Hertz ideal e os parâmetros constitutivos, na maior parte dos casos, não variam com a frequência. Para quaisquer meios lineares e isotrópicos, os parâmetros constitutivos podem ser incluídos no modelo. Além disso, eles podem modelar dielétricos com frequência dependente da permissividade descrita pela fórmula de Debye (Giannopoulos, 2002) de acordo com a equação:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}, \quad (1)$$

onde  $\mathcal{E}_\infty$  é a permissividade dielétrica em altas frequências,  $\mathcal{E}_s$  é a permissividade DC,  $\omega$  é a frequência angular e  $j = \sqrt{-1}$ .

Em geral, nos algoritmos utilizados para modelagem numérica, o tamanho da célula é definido de acordo com os critérios de estabilidade numérica. Adicionalmente ajusta-se esse tamanho à resolução necessária para definição do alvo. Portanto, deverá existir uma correlação direta entre a frequência do pulso eletromagnético emitido pela fonte e o tamanho do alvo, para que seja possível a total definição no modelo. Um outro fator que influencia a discretização é o erro associado com a dispersão numérica induzida. Este erro pode ser mantido em um mínimo, se seguida a seguinte regra (Giannopoulos, 2002):

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10}. \quad (2)$$

### Construção do modelo

Com a construção do modelo pode-se simular o resultado de um levantamento a partir de parâmetros pré-definidos para determinada frequência. Sendo os valores de permissividade dielétrica e condutividades, fundamentais para o cálculo da propagação da velocidade no meio geológico.

Segundo Porsani (2002) uma das maneiras de se obter a velocidade da onda de radar no meio é converter o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade. Isto pode ser feito através da constante dielétrica do solo, substituindo esta na expressão de velocidade abaixo:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mathcal{E}_r}}, \quad (3)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c=0.3\text{m/ns}$ ) e  $\mathcal{E}_r$  é a constante dielétrica dos materiais.

A construção do modelo, baseada em estruturas geológicas, foi realizada através da foto mosaico trabalhada por Ramos (2002), como pode ser visualizado na Figura 2.

Os parâmetros utilizados para a construção do modelo compõem-se de uma malha de  $0.05 \times 0.05 \text{ m}^2$ , com antena de frequência de 100 MHz. Cujas propagação da onda eletromagnética considerada é o modo TE ( $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ), que segundo Liu *et al.* (2002) é sempre orientada perpendicular à direção de propagação.

O pulso utilizado é do tipo *wavelet Ricker* com amplitude igual a 1. O modelo tem dimensões  $50 \times 14 \text{ m}^2$ , composto por seis variações litológicas como mostra a Figura 2. Para a construção do modelo foram utilizados 195 traços (amostras) separados de 0.25 m. Com separação entre as antenas transmissora e receptora de 1.0 m e o tempo total de amostragem  $.3 \mu\text{s}$ . A posição inicial da antena transmissora está em (0.0, 13.30m) deslocando-se a cada 0.25 m na direção x. Já a posição inicial da antena

receptora é de (1.0 13.30m), deslocando-se conjuntamente com a antena transmissora.

O modelo é não magnético. Os parâmetros como permissividade dielétrica relativa - a qual controla a velocidade de propagação - e condutividade elétrica - que controla a atenuação - são mostrados na Tabela 2.

### Aquisição e Processamento

A parte superior do afloramento apresenta uma região completamente plana e sem vegetação o que facilitou a coleta dos dados. O levantamento do perfil foi realizado a 2 m da extremidade do corte, perpendicular às suas litofácies, com 50 m de extensão. Embora não haja muita variação litológica pode ser observada a presença de um pequeno grabén na parte central do perfil (Fig.1).

A aquisição dos dados foram feitos com o equipamento Pulseekko IV com antenas biestáticas de 100 MHz, num *off-set* inicial entre as antenas transmissora e receptora de 1 m e com espaçamento contínuo entre as antenas de 0.25 m, através do modo de reflexão simples, utilizando um intervalo de amostragem de 512 ns, para uma frequência de Nyquist de 85 MHz. Sendo aplicado à correção do "Time Zero" automático.

O dados foram processados através do programa de processamento para dados sísmicos Vista 2D/3D 4.00, em duas etapas. A primeira consistiu com a aplicação do algoritmo para balanceamento de frequência (s20fba.fw) que trabalha com quatro diferentes construções de filtros passa-banda trapezoidal (OrmsbyB), com a possibilidade da aplicação do ganho AGC, o qual tem o objetivo de equalizar as amplitudes em cada banda de frequência, com alguns "overlaps" necessários. Na segunda etapa foi utilizado novamente o filtro passa-banda seguido de ganho exponencial nos dados para recuperação de amplitude (Fig. 2).

O modelo geológico (Fig.3) foi construído com valores de permissividade a partir de referências bibliográficas. O resultado do modelo pode ser aferido na Figura 4 e, com os resultados foi possível construir um modelo de seis camadas.

Os dados foram migrados em profundidade com migração *Stolt* utilizando velocidades intervalares da Figura 5. Esta migração trabalha no domínio da frequência.

### Análise dos Resultados

O resultado obtido através do radargrama (Fig.2) confirma a existência de uma grande feição na parte central do perfil correspondente ao graben e às principais zonas de falha que aparecem evidenciadas na parede do afloramento. Com a foto mosaico obtida a partir do afloramento foi possível a construção do modelo geológico com as seis variações litológicas (Fig.3).

Observou-se que os valores escolhidos no modelo sintético (Fig.4) foram adequados para o problema. Com estes valores foi realizada a análise de velocidade das camadas como pode ser visualizado na Figura 5.

Comparando-se as Figuras 6 e 1 é evidente a semelhança entre as grandes e pequenas feições estruturais no afloramento além de extensão e profundidade.

### Conclusões

A modelagem FDTD mostrou-se viável para simulação, análise e entendimento do modelo, fornecendo resposta acurada e eficiente para a frequência de 100 MHz, com uma maior resolução com a forma hiperbólica clássica que determina a posição e geometria do alvo.

Este estudo mostrou a utilidade de dados sintéticos no processo da seleção dos melhores parâmetros de permissividade a serem utilizados na análise de velocidade, substituindo levantamentos CMP, para aquisições em perfis próximos ao afloramento. A migração da imagem dos dados de radar obtido reconstruiu correspondentemente as feições estruturais do afloramento estudado.

A transposição das técnicas de processamento de dados sísmicos para os dados de GPR em afloramentos vem a colaborar para o estudo de reservatórios em grandes profundidades, auxiliando em ajuste de parâmetros e a eficácia dos processamentos sísmicos.

### Referências

**Giannopoulos, A.** 2002. GPRMAX2d. User's Manual. Version 1.5.

**Liu., L. e Arcone S. A.** 2002. Numerical Simulation of Near –Surface GPR in TE and TM Modes. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar. April Penetrating Radar. April 29 – May 2, Santa Bárbara, Califórnia USA. P273-278.

**Marques J.J. E.** 1999. Curso – O Radar de Penetração de Solo - GPR. Teoria – Aquisição Processamento Interpretação.

**Porsani J. L.** 2002. Método GPR, Aplicações em geologia, geotécnica, meio ambiente e planejamento urbano. IV Escola de Verão de Geofísica. Versão 3.0 Universidade de São Paulo.GPR.

**Ramos, R., R., C.** 2002. Sistemas Aluviais Terceários da bacia de Resende/RJ: Análise de Fácies e revisão estratigráfica. Exame de Qualificação. Orientadores DR. Cláudio Limeira Mello e Renato Rodolfo Andreis. Rio de Janeiro. Junho de 2002. Universidade federal do Estado do Rio de Janeiro. CCMN – Instituto de geociências. Programa de Pós-Graduação. Graduação em Geologia. Setor de paleontologia e Estratigrafia.

**Riccomini, C., Appi, C., J., Freitas L., E. e Arai, M.** 1987. Tectônica e Sedimentação no Sistema de Rifts Continentais as Serra do Mar (Bacias de Volta, Resende, Taubaté e São Paulo). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA RJ-ES, 1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, SBG. V.1, p.253-298.

**Tutorial** - Vista 2D/3D Release 4.00 [Seismic Image Software](#), 1255, 815 - 8th Avenue, SW - Calgary, Alberta CANADA, T2P 3P2

### Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo ANP pelo apoio financeiro

NW

SE

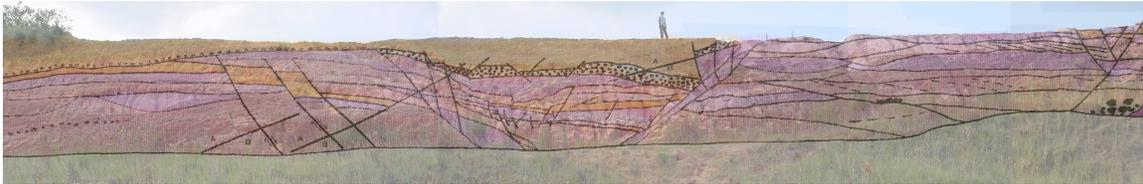


Figura 1 – Seção de Rádio Agulhas Negras, município de Resende/RJ, com uma escala de Escala: 1: 357 cm (Ramos,2002).

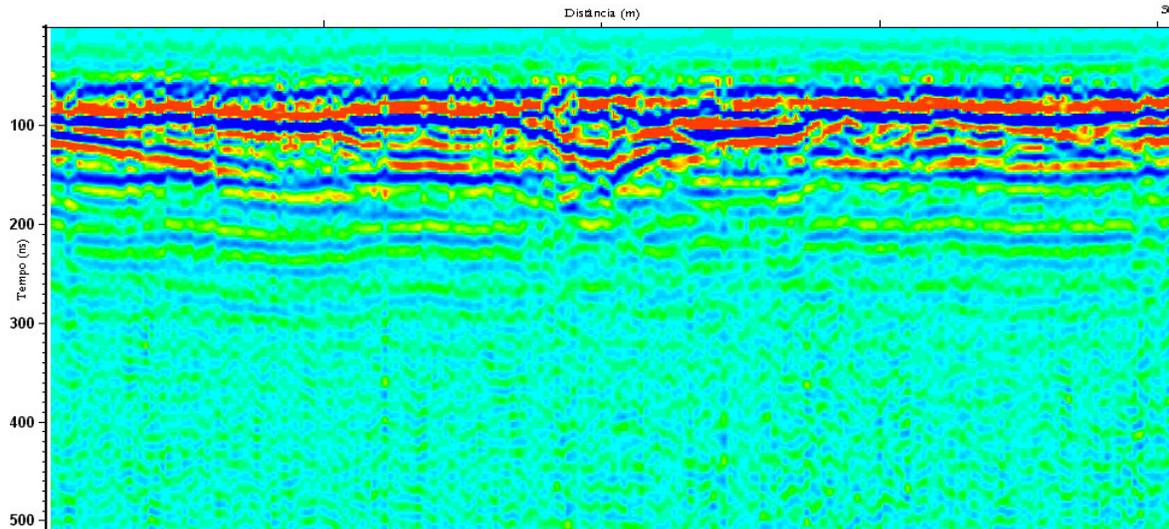
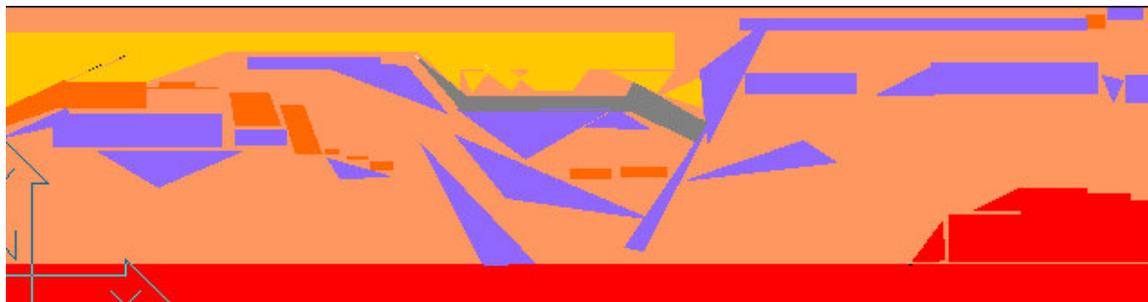


Figura 2 – Dados processados com o *software* Vista.



- Depósito de areia e argila
- Clasto
- Depósito de areia
- Depósito de argila
- Depósito de areia 1
- Embasamento

Figura 3 - Modelo geológico obtido a partir das fotos mosaicos do afloramento da estação de Rádio Agulhas Negras.

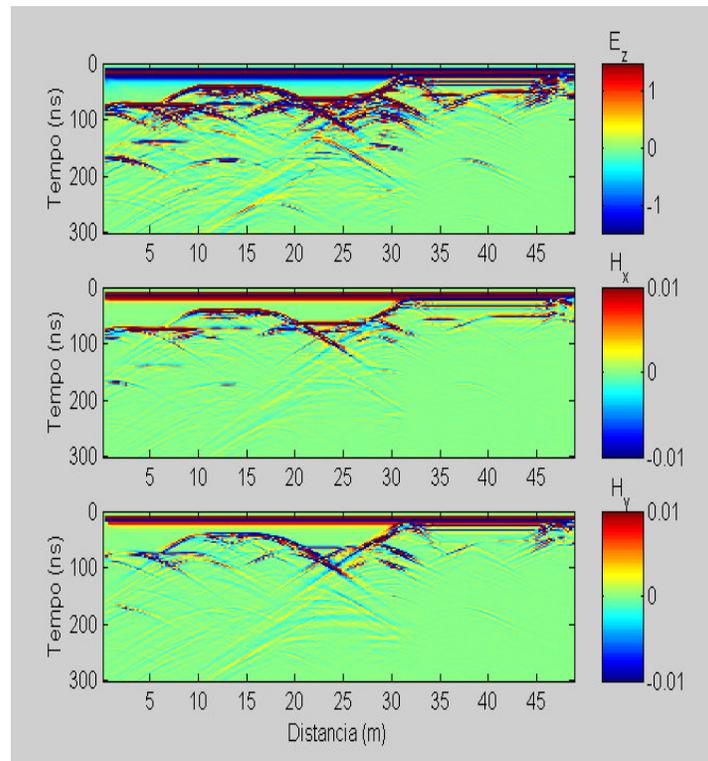


Figura 4 – Resultado obtido através do Modelo geolétrico para as componentes do campo eletromagnético.

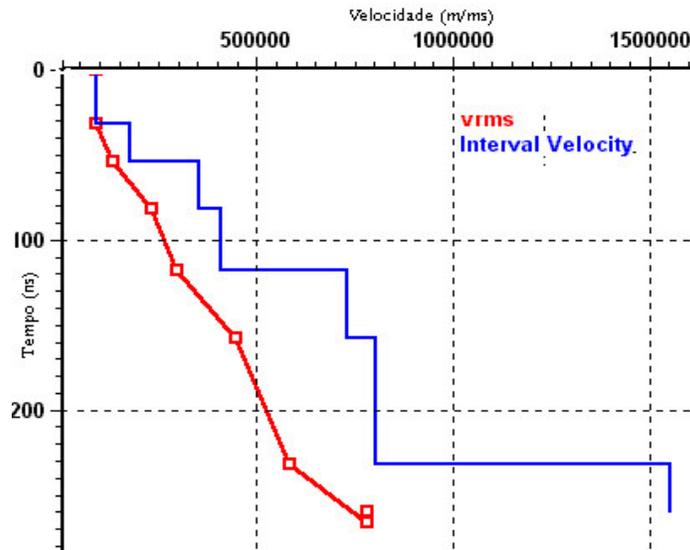


Figura 5 – Gráfico de velocidade intervalar e de velocidade rms para o modelo o modelo de sete camadas obtido a partir do modelo geolétrico.

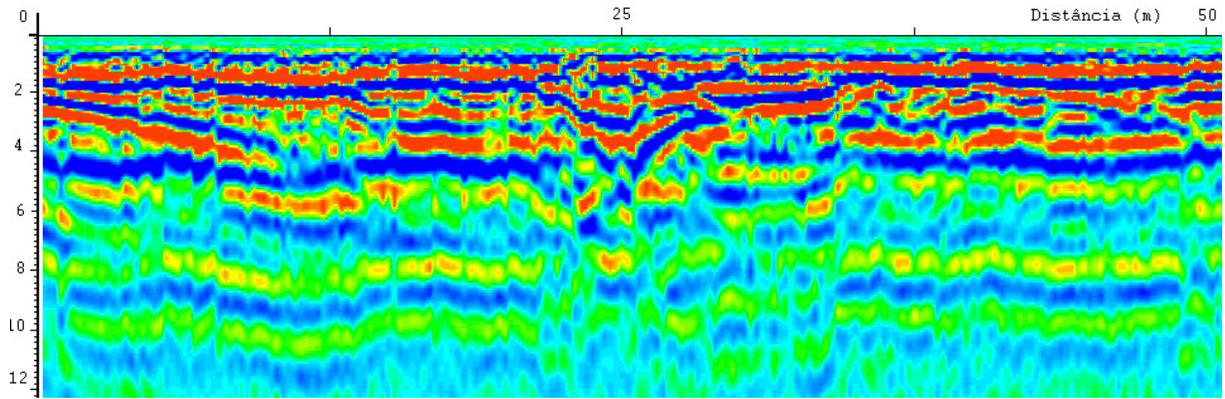


Figura 6 – Seção de profundidade e distância com migração FK 2D.

Tabela 1 – Classificação das litofáceis (Ramos, 2002).

CODIGO	ESTRUTURAS SEDIMENTARES	INTERPRETAÇÃO
<b>CCM</b>	Maciça ou com imbricação, estruturas canalizadas.	Correntes tradicionais em regime de fluxo superior (RFS)
<b>Bi</b>	Maciça	Erosão de substrato pelítica em RFS
<b>Ap</b>	Estratificação cruzadas planares agrupadas	Migração de Duna de crista reta (2D) em RFI alto
<b>At</b>	Estruturas acanaladas agrupadas ou solitárias	Migração de duna de crista sinuosa ou linguoide (3D) em RFI
<b>Am</b>	Maciça	Fluxo de detritos subaquosos
<b>Am1</b> <b>Am2</b>	Maciça	Fluxos gravitacionais
<b>Pm</b> <b>Pm2</b> <b>Pm3</b>	Maciça laminação mal definida	Decantação de carga suspensiva em canais abandonados
	Laminação, maciça.	Depósitos de planície de inundação

Tabela 2 – Parâmetros Físicos.

Meio	Permissividade Dielétrica (F/m)	Condutividade Elétrica (S/m)
Embasamento	7.0	1
Depósito de areia e argila	5.0	0.01
Depósito de areia1	20	0.1
Depósito de areia	4	0.01
Depósito de argila	15	285.15
Clasto	10	0.01