



## FINITE DIFFERENCE ELASTIC MODELING IN 2.5D OF SOLIMÕES PALEOZOIC BASIN

Francisco Neto<sup>1</sup>, Jesse Costa<sup>2</sup>, Amélia Novaes<sup>3</sup>, Brenda Barbosa<sup>4</sup>

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

### Resumo

Modelar a propagação da onda sísmica em bacias paleozóicas na Amazônia constitui um desafio para a simulação numérica e interpretação. A região possui como características, uma zona de baixa velocidade intemperizada, o forte contraste de velocidade na discordância Cretáceo-Paleozóico, soleiras de diabásio altamente fraturadas, e rochas reservatório de abaixo da resolução das ondas sísmicas. Serão apresentados os resultados da modelagem 2.5-D da propagação da onda elástica em um modelo sintético representativo da região. Foi verificado a forte ocorrência de múltiplas de longo período e a existência de forte conversão entre as ondas P-S.

### Abstract

Seismic modeling of paleozoic basins in the Amazon has its challenges for numerical simulation and interpretation. The low velocity layer, associated with the weathering zone, needs a more accurate rheological model; strong velocity contrasts at the Cretaceous-Paleozoic unconformity; highly fractured diabase layers, and reservoir rocks with thickness below seismic waves resolution. We present the results of 2.5-D elastic wave propagation simulation in models with some of these features. Long period multiples between the free surface and Cretaceous-Paleozoic unconformity, and high P-S wave conversion are marked features of this modeling.

### 1. Introdução

A região Amazônica pode ser considerada auto-suficiente em petróleo e boa parte de sua produção destina-se ao mercado externo. Na província petrolífera do Urucu, Bacia do Solimões, por exemplo, o petróleo produzido é considerado o de melhor qualidade no país, sendo refinado a partir dele essencialmente derivados mais nobres como diesel e nafta. Fatores como a densa mata que cobre a região, áreas alagadas, falta de afloramentos, reservas naturais e indígenas dificultam a exploração em superfície. Estudos indiretos, e.g. sísmica 2-D e 3-D, vem se mostrando, portanto, uma alternativa com o melhor custo-benefício na região.

Neste trabalho modelamos a propagação do campo elástico 2.5-D, através do método de diferenças finitas de com operadores de altas ordens (Holberg, 1987). Fronteiras absorventes do tipo PML (Chew e Liu, 1996) foram implementadas nas bordas laterais e inferior do modelo para eliminar as reflexões indesejadas provenientes das bordas devido ao truncamento do modelo. Seções sísmicas obtidas através da medida do campo total (direto, refletido e múltiplas) na fronteira do modelo são apresentadas.

<sup>1</sup> Mestre, Doutorando - CPGF-UFPA

<sup>2</sup> Doutor, Professor - CPGF-UFPA

<sup>3</sup> Doutora, Professora - IMECC-UNICAMP

<sup>4</sup> Mestra, Doutoranda - CPGF-UFPA

Registros de reflexões múltiplas associadas ao elevado contraste de impedância acústica na discordância Cretáceo-Paleozóico e a fronteira livre, dificultam a interpretação dos dados sísmicos. Um problema para a modelagem acústica nessa área é a baixa resolução da onda sísmica na região do reservatório, devido ao comprimento de onda na região ser da ordem de três a quatro vezes maior que a espessura do reservatório (Silva Neto, 2004). Esse problema pode ser parcialmente resolvido através da modelagem elástica, devido ao fato o comprimento da onda *S* ser da ordem da espessura do reservatório (Silva Neto, 2005a).

A modelagem 3-D da propagação da onda em um meio elástico é cara do ponto de vista computacional, pois requer uma série de recursos, entre eles, um grande volume de memória para processamento e armazenamento dos dados, mesmo quando utilizados modelos modestos de pequenas dimensões, tais recursos nem sempre estão disponíveis, o que inviabiliza esse tipo de aplicação. Caso a modelagem 3D para é efetuada em modelos em que as propriedades físicas são invariantes por translação ao longo de uma direção, e tanto fontes quanto receptores são posicionados no plano de simetria do modelo, tem-se então a modelagem 2.5-D. Esta abordagem simplifica o processo computacional e mostra-se com alternativa viável à modelagem 3D (Silva Neto et al., 2005b).

## 2. Caracterização Fisiográfica da Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões fica na Região Norte do Brasil, entre os paralelos 2° e 8° S. e meridianos 62° e 72° O., é limitada ao norte pelo Escudo das Guianas, ao sul pelo Escudo Central Brasileiro, a leste pelo Arco de Purus e a oeste pelo Arco de Iquitos, estando inteiramente situada no Estado do Amazonas. Ela pode ser dividida em duas sub-bacias, separadas pelo arco estrutural de Carauari: Sub-bacia do Jandiatuba e Sub-bacia do Juruá conforme mostra a Figura 1.

As soleiras de diabásio ocorrem em todas as nossas bacias paleozóicas. Na Bacia do Solimões, por exemplo, o evento magmático relacionado à abertura do Atlântico Norte injetou centenas de milhares de quilômetros cúbicos de material magmático entre as sedimentares paleozóicas. Três grupos de soleiras, com espessura superior a 150 metros cada, intrudiram as camadas argilosas (Figura 1), acompanhando grosseiramente seus planos de estratificação (Eiras, 1999).

O evento magmático responsável pelas soleiras foi o grande responsável pelas concentrações e o tipo de petróleo encontrado na região amazônica, pois serviram de fonte energética poderosa na catalisação do processo de maturação da matéria orgânica. Basicamente, onde as soleiras intrudiram próximas à rocha geradora foi gerado essencialmente gás, e.g. Província do Juruá. Por outro lado, onde as soleiras se colocaram entre os estratos sedimentares numa posição mais intermediária foi gerado óleo e gás, e.g. Província do Urucu.

Embora tenha sido fundamental na formação das reservas petrolíferas na região, sob o ponto de vista exploratório, a presença de rochas magmáticas no interior de bacias sedimentares pode deteriorar a qualidade das seções sísmicas devido a perda do sinal, formação de múltiplas e divergência esférica, e podem prejudicar a interpretação dos dados pela formação de falsas estruturas devido ao efeito de *pull-up* ou *pull-down* (Eiras, 2002).

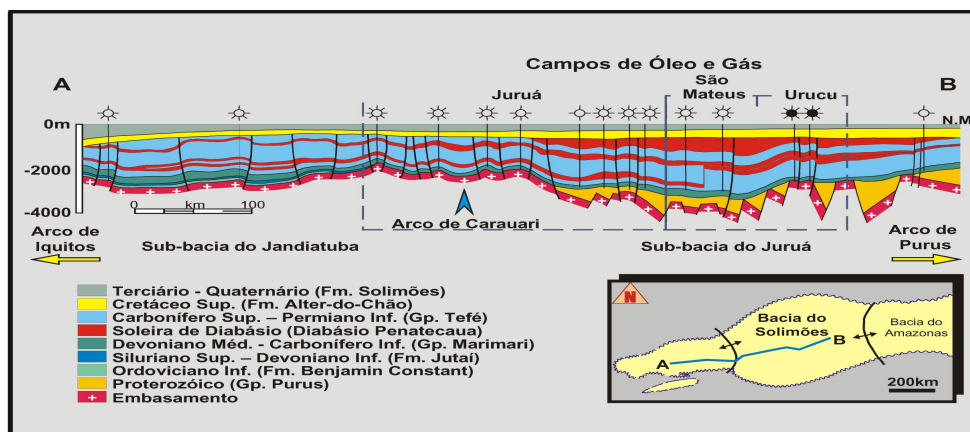


Figura 1. Seção geológica regional da Bacia do Solimões (Eiras et al., 1996).

### 3. Modelo Geológico Sintético

O modelo geológico sintético ( Lima et al., 2003 ) foi obtido a partir de uma seção sísmica 2D interpretada a qual é mostrada na Figura 2, obtida na província petrolífera do Urucu (Eiras, 1998). Foram identificados na seção 8 camadas de rochas sedimentares, 3 soleiras de diabásio, mais o embasamento. A litologia considerada para cada camada foi baseada no trabalho de Eiras et al., 1994.

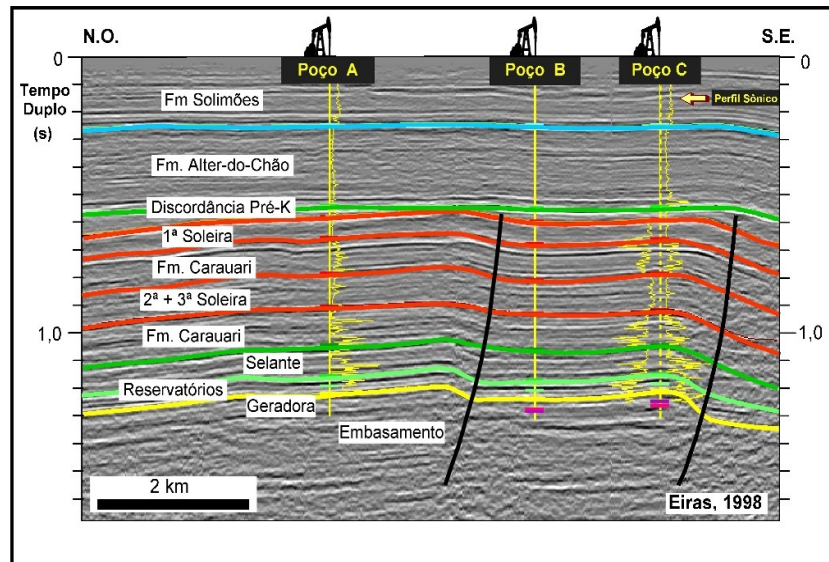


Figura 2. Seção sísmica interpretada, migrada no tempo. Os principais refletos foram identificados com auxílio de dados de poço, perfis de raios gama e sônico nos poços A e C (Modificado de Eiras, 1998).

O modelo sintético utilizado tem 8000 m metros de extensão por 3000 m de profundidade, e foi discretizado em uma malha regular com 10 m de distância entre cada nó, a Figura 3 apresenta a velocidade da onda compressional. Convém destacar na Figura 3 o contraste de velocidade entre a camada correspondente ao Cretáceo (até 500 m) e a região do Paleozóico (abaixo dos 500 m), bem como as soleiras de diabásio intrudidas na seção Paleozóica identificadas em vermelho intenso, as rochas selante e reservatório também são apresentadas (entre 2000 m e 2500 m), como pode ser visto a rocha reservatório tem uma fina espessura (em amarelo), o que dificulta o processo de interpretação sísmica, devido a baixa resolução da onda nessa região (Silva Neto, 2004).

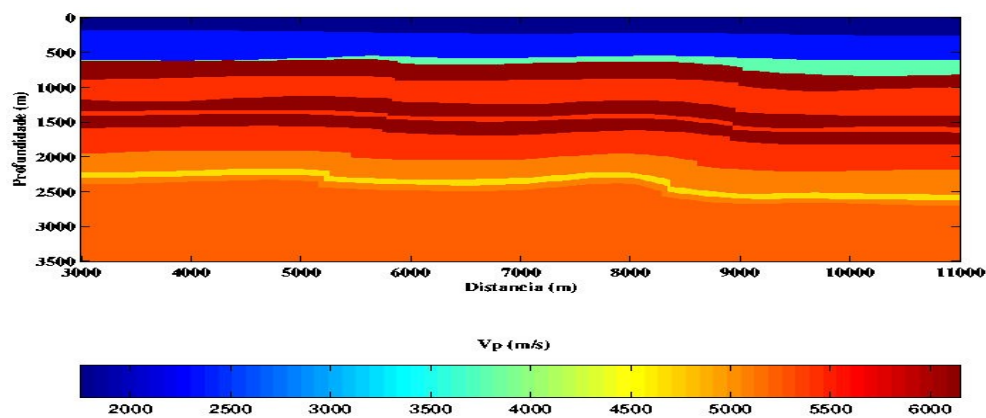


Figura 3. Modelo sintético da Bacia do Solimões, construído a partir da interpretação sísmica mostrada na Figura 2. Apresenta-se a velocidade da onda compressional.

O modelo de densidade foi construído a partir do modelo de velocidade da onda compressional através da equação de Gardner (1974) , e o modelo de velocidade da onda S foi criado com base no estudo litológico da região apresentado em Eiras , 1998 .

#### 4. Métodos

Utilizamos a representação do campo elástico através da formulação tensão-velocidade . O campo de velocidade  $v_i(x, t)$  , e o campo de tensão,  $\sigma_{ij}(x, t)$  , devem obedecer (Mittet, 2002)

$$\frac{\partial v_i(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3} \right] + \frac{1}{\rho} f_i(t) \delta(x - x_0), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}(x, t)}{\partial t} = \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) \sigma_{ij} + \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \mu + q(t) \delta_{ij} \delta(x - x_0) \quad (2)$$

Onde  $\rho(x)$  é densidade de massa,  $\lambda(x)$  e  $\mu(x)$  são os parâmetros de Lamé,  $f_i$  é uma fonte inpusiva, e  $q$  é a taxa de injeção de volume. Considerando que as propriedades do material são invariantes por translação na coordenada  $x_2$  nós podemos expressar o campo de onda por (Silva Neto et al, 2005a):

$$v_i(x, t) = \frac{1}{2} \int v_i(x_1, k_2, x_3, t) \exp(ik_2 x_2) dk_2, \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}(x, t) = \frac{1}{2} \int \sigma_{ij}(x_1, k_2, x_3, t) \exp(ik_2 x_2) dk_2. \quad (4)$$

A simetria do meio e as fontes ao redor do plano  $x_2=0$  tem como consequência sobre os campo de velocidade  $v_2(x_1, -x_2, x_3) = -v_2(x_1, x_2, x_3)$  , e  $\sigma_{2j}(x_1, k_2, x_3)$  é uma quantidade imaginária pura . Definindo as quantidades reais,

$$\begin{aligned} u_2(x_1, k_2, x_3) &\equiv i v_2(x_1, k_2, x_3) , \\ \tau_{12}(x_1, k_2, x_3) &\equiv i \sigma_{12}(x_1, k_2, x_3) , \\ \tau_{23}(x_1, k_2, x_3) &\equiv i \sigma_{23}(x_1, k_2, x_3) , \end{aligned} \quad (5)$$

Após as devidas substituições de (5) em (1) e (2), as equações finais da modelagem elástica 2.5-D , são então definidas por

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + k_2 \tau_{12} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \right] + \frac{1}{\rho} f_1(t) \delta(X - X_0),$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_2}{\partial t} &= 1 \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} - k_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \right], \\
\frac{\partial v_3}{\partial t} &= 1 \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} + k_2 + \frac{\partial}{\partial x_3} \right] + \frac{1}{2} f_3(t) (X - X_0), \\
\frac{\partial}{\partial t} &= \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + k_2 u_2 + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 2 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + q(t) (X - X_0), \\
\frac{\partial}{\partial t} &= \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + k_2 u_2 + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 2 \frac{\partial v_3}{\partial x_3} + q(t) (X - X_0), \\
\frac{\partial}{\partial t} &= \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + k_2 u_2 + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) + 2 k_2 u_2 + q(t) (X - X_0), \\
\frac{\partial}{\partial t} &= (x) \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - k_2 v_1 \right), \quad \frac{\partial}{\partial t} = (x) \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_3} + \frac{\partial v_3}{\partial x_1} \right), \quad \frac{\partial}{\partial t} = (x) \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} - k_2 v_3 \right),
\end{aligned} \tag{6}$$

Estas equações foram resolvidas por esquema de diferenças finitas em uma malha em que as os campos e as propriedades físicas estão dispostos de modo intercalado (Levander, 1988) para cada valor de  $k_2$ . Utilizamos uma aproximação de segunda ordem para as derivadas temporais e aproximações de alta ordem para as derivadas espaciais. As componentes do campo de velocidade,  $v_1$  e  $v_3$ , para os receptores localizados no plano  $x_2=0$ , são calculados utilizando (3), a qual se reduz nesse caso a :

$$v_i(x_1, 0, x_3, t) = \frac{1}{2} \int v_i(x_1, k_2, x_3, t) dk_2.$$

Implementamos uma condição de fronteira livre na parte superior do modelo (Mittet, 2002) e camadas absorventes do tipo PML (Chew e Liu, 1996) foram colocadas no fundo e nas laterais do modelo.

A condição de estabilidade para o esquema de diferenças 3-D, não discutido aqui, é

$$t \leq \sqrt{\frac{2}{3d_0^{(2)}}} \frac{x}{c_P} \tag{7}$$

Em que  $t$  incremento no tempo,  $x$  é o espaçamento da malha,  $C_P$  é a velocidade da onda P e :

$$d_0^{(2)} = \sum d_j$$

Onde  $d_j$  são os coeficiente do operador de diferenças de primeira derivada, com  $N$  igual à ordem da aproximação de diferenças finitas. Para que o esquema 2.5D obedeça (7) (Novaes e Santos, 2004), nós podemos determinar o máximo valor para o número de onda (Silva Neto, 2004) através de :

$$k_{2_{max}} \leq \frac{\sqrt{2d_0^{(2)}}}{x}. \quad (8)$$

A taxa de amostragem do número de onda  $k_2 = 2 / (Vp_{max} t_{total} / dx)$ . em que is  $Vp_{max}$  é a máxima velocidade da onda P e  $t_{total}$  é o tempo total de amostragem. Para que um esquema de ordem superior a 12 a discretização espacial necessária para evitar dispersão numérica, deve ser :

$$x \leq \frac{1}{3} \frac{C_{S_{min}}}{f_{max}}$$

Em que  $C_{S_{min}}$  é a menor velocidade da onda S  $f_{max}$  é o limite da banda de frequência da fonte.

## 5. Experimento Numérico

O campo elástico foi propagado sobre o modelo apresentado na Seção 3, foi utilizado uma fonte de injeção de volume com a *wavelet* Blackman-Harris, de frequência dominante de 15 Hz, e frequência máxima de 30 Hz, sendo o tempo de propagação de 3 s e a amostragem feita a cada 2ms. A fonte foi posicionada nas coordenadas (4250m , 20m ). Foram utilizados 400 receptores posicionados a partir das coordenadas (4500m , 20m ) e igualmente espaçados por uma distância de 10 m, com esse arranjo foi possível cobrir uma área considerável do modelo, de modo a registrar os eventos associados às ondas S.

A modelagem foi efetuada em um computador do tipo *cluster* com 20 nós, com dois processadores por nó, pois o código 2.5-D pode ser paralelizado facilmente, em função do número de onda, desse modo são computados simultaneamente os campos associados a diversos números de onda.

São apresentados nas Figuras 4a 4b e 4c , os registros do campo de tensão total, e as componentes horizontal e vertical do campo de velocidade. Verifica-se a enorme quantidade de reflexões múltiplas, bem como a forte conversão da onda P para S e S para P, esses eventos dificultam a interpretação e o processamento dos resultados.

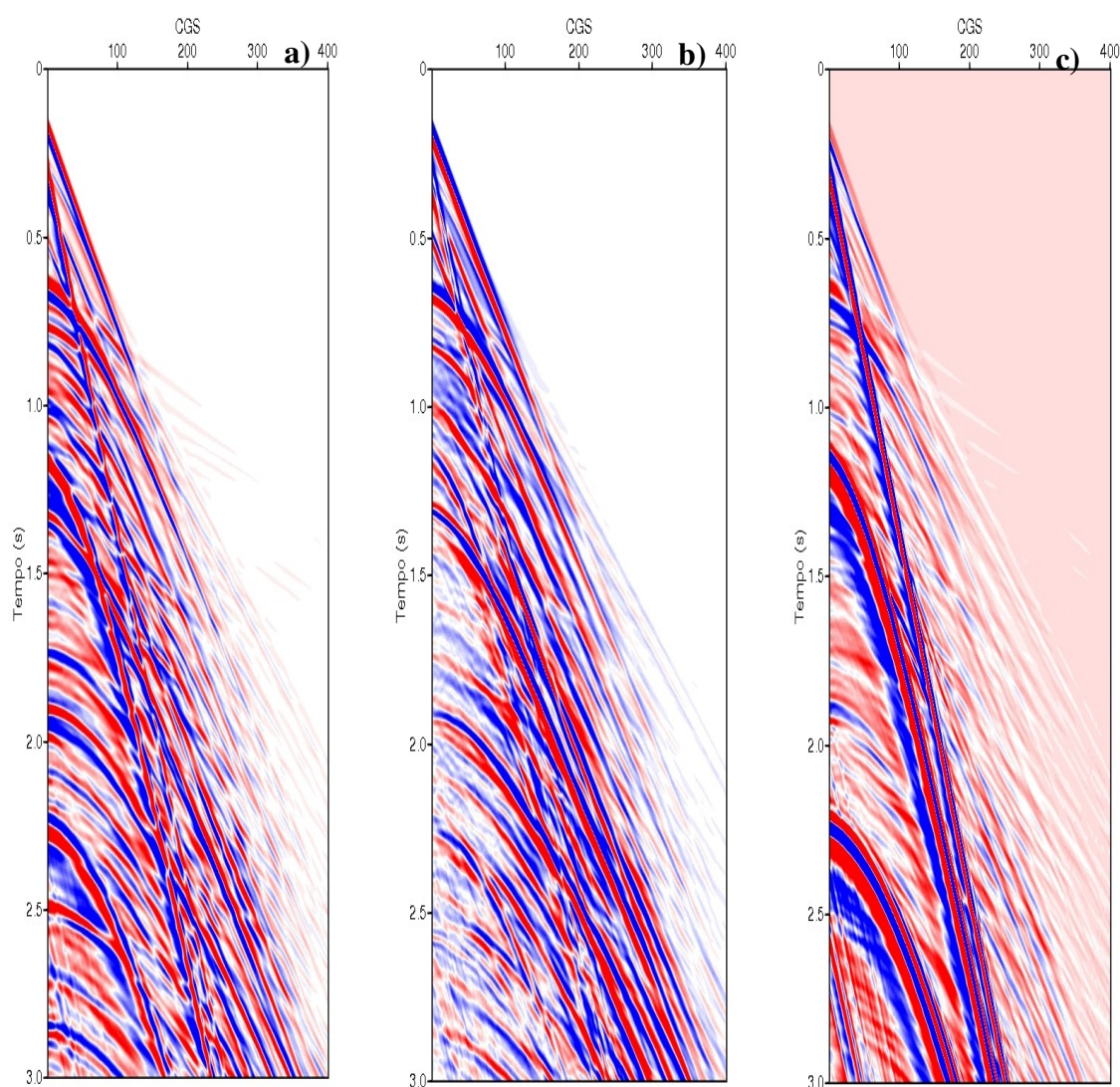


Figura 4 . Registros dos campo de tensão (a) e a das componentes horizontal(b) e vertical (c) do campo de velocidade. Verifica-se a grande quantidade de reflexões múltiplas, e as diversas conversões das ondas P e S .

## 6. Conclusões

A Bacia Paleozóica do Solimões tem importância fundamental à exploração de petrolífera no Brasil. A interpretação e processamento de dados provenientes dessa região, é um desafio aos métodos atuais de imageamento sísmico, devido a grande ocorrência de reflexões múltiplas associadas as regiões de alto contraste de velocidade, e as várias soleiras de diabásio existentes,

A modelagem do campo elástico total através do método de diferenças finitas em 2.5-D tem como características marcantes, o baixo custo em termos de memória e tempo de execução, quando comparado a modelagem 3-D. A aplicação da modelagem 2.5-D em computadores do tipo *cluster*, é um grande atrativo, pois o esquema pode ser facilmente paralelizado em função do número de onda.

Futuramente será criado um conjunto de dados sintéticos, através da modelagem 2.5-D, para a avaliação do uso de ondas S para o imageamento sísmico.

## 7. Agradecimentos

A FINEP/CNPQ e à PETROBRAS pelo apoio financeiro, através da Rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório,

## 8. Referências

- CHEW, W. C. e LIU, H. Q. Perfectly matched layers for elastodynamics: A new absorbing boundary condition. *J. Computational Acoust.*, v. 4, n 4, p72-79, 1996.
- EIRAS, J. F. BECKER, C. R., SOUZA, E. M., GONZAGA, F. G., SILVA, J. G. F., DANIEL, L. M. F., MATSUDA, N. S., FEIJÓ, F. J. Bacia do Solimões. Boletim de Geoc. da Petrobras, nº1, v.8, p. 17-45, 1994.
- EIRAS, J. F. Influência tectônica do arco de Carauari na sedimentação fanerozóica da Bacia do Solimões, Norte do Brasil. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 39, Salvador. Anais... Salvador : SBG – Núcleo Bahia-Sergipe, p. 50-53. 1996.
- EIRAS, J. F. Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. *In: Searching for Oil and Gas in the Land of Giants*. TAHA, M. (Schlumberger Ed.). The Search, Edição Especial Sobre o Brasil, cap. 2, p. 23-31, 1998.
- EIRAS, J. F., WANDERLEY, F. Ocorrências de petróleo relacionadas a rochas magmáticas fanerozóicas. *In: Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados*, 2, Belém. Boletim de Resumos e Roteiro da Excursão. Belém: Núcleo PRONEX do Centro de Geociências da UFPA, p. 54. 2002.
- GARDNER, G. H. F., GARDNER, L. F., e GREGORY, A. F. Formation velocity and density-the diagnostic basis for stratigraphic traps. *Geophysics*, v. 39, n 6, p770-780, 1974.
- HOLBERG, O. Computational aspects of the choice of operator and sampling interval for numerical differentiation in large-scale simulation of wave phenomena. *Geophys.prosp.*, v. 37, p.629-655, 1988.
- LIMA, C. C. A., GARABITO, GERMAN e EIRAS, J. F. Modelagem sísmica por diferenças finitas - o exemplo da Bacia do Solimões. *In: Eighth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro. Abstracts Volume (CD-ROM). 2003.
- MITTET, R. Free-surface boundary conditions for staggered-grid modeling schemes. *Geophysics*, v. 67, n 5, 1616-1623, 2002.
- NOVAES, A. and SANTOS, L. T., 2.5-D finite-difference solution of the acoustic wave equation. *Geophysical Prospecting*. Accepted for publication, 2004.
- SILVA NETO, F. de A. Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos em 2-D e 2,5-D. Dissertação de mestrado, CPGF-UFPA, 2004.
- SILVA NETO, F. de A. COSTA, J., NOVAES, A., BARBOSA, B. Finite Difference Elastic Modeling in 2.5D, *In: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Salvador. Abstracts Volume (CD-ROM), 2005a.
- SILVA NETO, F. de A. , COSTA, J., EIRAS, J. F. , ELLEN, S. G. Modelagem Acústica e Elástica para a Bacia do Solimões, *In: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Salvador. Abstracts Volume (CD-ROM), 2005b.