



## Modelagem Sísmica Elástica 3D: Estudo de Caso na Bacia do Amazonas

Bulcão, A.<sup>1</sup>; Soares Filho, D.M.<sup>2</sup>; Gomes, A.L.O.<sup>3</sup>; Schmidt, J.<sup>3</sup>; Queiroz, N.P.<sup>3</sup>; Rosa Filho, J.C.<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>) COPPETEC/UFRJ, (<sup>2</sup>) CENPES/PETROBRAS, (<sup>3</sup>) PETROBRAS

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

The main focus of this work is concentrated on the Seismic Modeling schemes for 3D problems, using the Elastic Wave Equation. The computer program elaborated in this work use parallel processing resources and runs on microcomputer clusters, in order to reach the necessary computational power to operate the three-dimensional simulations concerned to the petroleum industry. Synthetic results for a velocity model with real proportions for the Amazonian basin are presented and compared with real seismic data.

### Introdução

Neste trabalho apresenta-se de forma sucinta a metodologia, utilizando os recursos do processamento em paralelo, empregada no desenvolvido do programa de Modelagem Sísmica Elástica 3D. O principal enfoque se dá na aplicação da estratégia de Modelagem Sísmica em um exemplo realístico da indústria petrolífera, no qual o modelo de velocidades tridimensional é gerado através do processamento de dados sísmicos reais. Objetiva-se a comparação entre o dado sísmico sintético e o real, também são analisados os resultados das seções sísmicas empilhadas sintética e real.

Os dados sísmicos reais que foram analisados são oriundos da bacia do Amazonas, a qual possui características geológicas específicas. Dentre elas: o grande número de intrusões vulcânicas (dificultando a transmissão de energia para os horizontes mais profundos devido aos altos coeficientes de reflexão); e uma morfologia muito variável (impondo a aplicação de uma abordagem tridimensional da propagação de ondas).

Tais características, descritas no parágrafo anterior, afetam sobremaneira a qualidade dos dados adquiridos. Usualmente, nos dados sísmicos reais é pobre a definição e a caracterização dos eventos sísmicos mais importantes, como os reservatórios situados abaixo das soleiras.

Destaca-se entretanto que, a bacia amazônica possui campos produtores e potencial para novas descobertas, o que justifica uma tentativa de se refinar o processamento dos dados, e, obter uma resposta sísmica de melhor qualidade.

A estratégia apresentada neste trabalho, na qual adota-se a Modelagem Sísmica para a avaliação de determinada situação geológica de interesse é uma ferramenta de vital importância para a indústria petrolífera. De fato, segundo BERKHOUT (1984), os objetivos da Modelagem Sísmica podem ser resumidos como:

- o A verificação da resposta sísmica.
- o A avaliação das possibilidades, limitações e armadilhas dos Métodos Sísmicos;
- o A otimização dos parâmetros de aquisição;
- o O fornecimento de dados sísmicos de entrada para a avaliação de programas de processamento sísmicos (tal como os esquemas de Migração Sísmica);

### Metodologia

Neste trabalho, adota-se o esquema originalmente proposto por VIRIEUX (1984 e 1986) e, posteriormente, modificado por LEVANDER (1988) para a inclusão de operadores espaciais de quarta ordem, na simulação numérica dos problemas relacionados à propagação de ondas elásticas – ou seja, para a Modelagem Elástica.

Uma peculiar característica deste esquema, embora não explorada no exemplo apresentado a seguir, é a capacidade de simular um meio elástico onde a velocidade de propagação da onda cisalhante é nula ( $VS=0$ ). Desta forma, tal esquema comporta a simulação do acoplamento entre meios acústicos (onde tem-se  $VS=0$ ) e meios elásticos (onde  $VS \neq 0$ ).

A estratégia de paralelização empregada no programa de Modelagem Elástica 3D baseia-se na decomposição de domínio (*Domain Decomposition*), isto é, o domínio físico do problema é repartido em diversos subdomínios e cada um deles é enviado para ser resolvido por um processador diferente (MYCZKOWSKI, *et al.*, 1991 e EWING, *et al.*, 1994). Para manter-se a compatibilidade da solução entre os diversos pedaços torna-se necessária a comunicação entre eles.

Esta abordagem possibilita a solução de problemas de grande porte, que devido à grande quantidade de memória e ao tempo de processamento demandado para sua análise, atualmente, tornar-se-iam inviáveis de serem executados em um único microcomputador.

Na implementação computacional do programa de Modelagem Elástica 3D, adotando o paradigma da decomposição de domínio, emprega-se a biblioteca de funções do PVM (*Parallel Virtual Machine*) para a comunicação entre os processos. Deste modo, criaram-se dois programas distintos denominados *master\_3D\_EL* e *slave\_3D\_EL*. A seguir, descrevem-se as principais atribuições de cada um destes programas (BULCÃO, 2004):

*master\_3D\_EL* – (i) Inicia a análise e lê os dados de entrada, (ii) Inicializa o programa *slave\_3D\_EL*; (iii) Divide e envia o modelo de velocidades e demais parâmetros para os programas *slave\_3D\_EL*; (iv) Gerencia e sincroniza a execução entre as instâncias dos programas *slave\_3D\_EL*; (v) Recebe os dados de saída enviados pelos programas *slave\_3D\_EL* (sismogramas e *snapshots*); (vi) Finaliza a análise.

*slave\_3D\_EL* – (i) Recebe a partição do modelo de velocidade e demais parâmetros que lhes são devidos; (ii) Calcula a solução para um determinado intervalo de tempo; (iii) Envia e recebe os valores das incógnitas nas interfaces das partições para as demais instâncias do programa *slave\_3D\_EL*; (iv) Envia os dados de saída para o programa *master\_3D\_EL* (sismogramas e *snapshots*).

A figura 1 ilustra esquematicamente – considerando sem perda de generalidade um modelo geológico 2D – uma possível decomposição de domínio, além da configuração dos microcomputadores e os programas executados em cada um deles. Neste caso, a cada instante de tempo na qual avança-se com a solução da Equação Elástica da Onda, realiza-se a troca das informações de cada uma das partições que devem ser transmitidas aos respectivos vizinhos para manter-se a compatibilidade da solução.

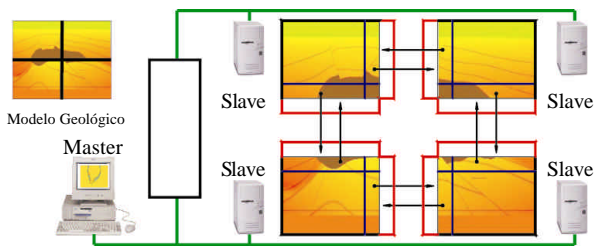


Figura 1 – Representação esquemática da estratégia adotada de paralelização com decomposição de domínio.

Neste trabalho não se objetiva a apreciação de aspectos relacionados à análise da performance e o tempo de execução dos programas desenvolvidos, em BULCÃO (2001) e BRAGANÇA *et al.* (2003) apresenta-se um estudo a este respeito com relação aos programas de Modelagem Sísmica bi- e tridimensionais, empregando tanto operadores acústicos quanto elásticos.

Destaca-se que, para viabilizar a execução do programa de modelagem elástica 3D em um *cluster* de microcomputadores, visando a execução das simulações numéricas dos diversos tiros de um determinado levantamento sísmico, empregou-se um programa desenvolvido de gerenciamento de tarefas, denominado *Master\_SISMOS*.

Tal programa de gerenciamento de tarefas – também emprega os recursos do processamento em paralelo – é constituído por quatro programas distintos, os quais utilizam a biblioteca de funções do PVM (*Parallel Virtual Machine*) para a comunicação entre seus processos. As principais atribuições destes programas são descritas a seguir:

- MASTER – Gerencia a execução das tarefas. Inicia a execução do programa slave em determinado grupo de microcomputadores do cluster, enviando todas as informações necessárias para que tal simulação seja realizada;
- AGENTE – Monitora o andamento das tarefas e a configuração do cluster, informando ao programa master caso haja alguma alteração no número de hosts disponíveis para a execução das tarefas;
- CONTROLE – Proporciona a interação entre o usuário e o programa master, que a qualquer instante requisita relatórios sobre o andamento das tarefas, bem como comandos para que determinada tarefa seja refeita;
- SLAVE – Realiza uma determinada seqüência de comandos em shell script para que a tarefa seja realizada.

**Construção do Modelo de Velocidades**

O modelo de velocidade utilizado nas modelagens elásticas foi obtido através de uma conversão tempo-profundidade TAU-ZO do campo de velocidades RMS do processamento original do dado sísmico. Este procedimento originou um *grid* de velocidades com 1693 x 1285 x 401 pontos, possuindo um intervalo de 10 m entre os pontos do *grid*.

Na figura 2 ilustram-se alguns planos de corte sobre o modelo de velocidades. Sendo que suas dimensões abrangem uma área de 16,9 Km por 12,8 Km, com uma profundidade de 4,0 Km. É importante observar que as dimensões do modelo de velocidades são significativas, em uma escala razoável, podendo englobar grandes feições geológicas.

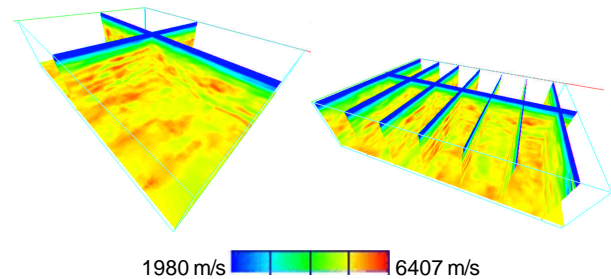


Figura 2 – Planos de corte do modelo de velocidades, obtido através de uma conversão tempo-profundidade TAUZO.

**Modelagem Elástica 3D**

Em uma primeira etapa realizou-se, empregando o programa desenvolvido de modelagem elástica 3D, a simulação de um único tiro localizado no centro da superfície do modelo de velocidades. Nesta simulação os dados sísmicos foram adquiridos em toda a superfície do modelo, considerando-se um tempo total de registro de 8.0 segundos. Os demais parâmetros empregados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Principais parâmetros empregados na simulação de um único tiro localizado no centro do modelo de velocidade.

Frequência de corte	38 Hz
Intervalo tempo para avanço da solução	0.2 ms

Além da aquisição dos sismogramas referentes aos deslocamentos das partículas e as componentes do tensor de tensões (grandezas básicas do esquema adotado para a simulação numérica da propagação de ondas elásticas), foram registrados *snapshots* do campo de ondas de deslocamento em determinados instantes. Na figura 3 tem-se a representação de alguns deles, para o deslocamento da partícula na direção Z.

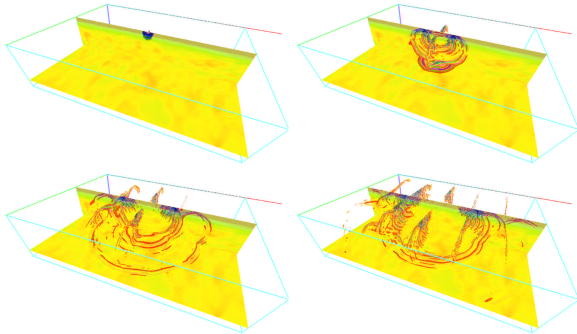


Figura 3 – Snapshots do campo de deslocamento da partícula na direção Z.

Destaca-se que na figura 3, ao deslocamento da partícula na direção Z, o campo de ondas está sobreposto a determinados planos de corte do modelo de velocidade. Também, para a ilustração deste campo de ondas, explora-se um efeito de transparência, no qual representam-se somente os maiores valores em módulo para a grandeza em questão.

Na figura 4 apresentam-se os sismogramas referentes aos deslocamentos da partícula nas direções X, Y e Z, registrados nos receptores que se encontram localizados ao longo da direção X sobre o ponto de aplicação da fonte sísmica.

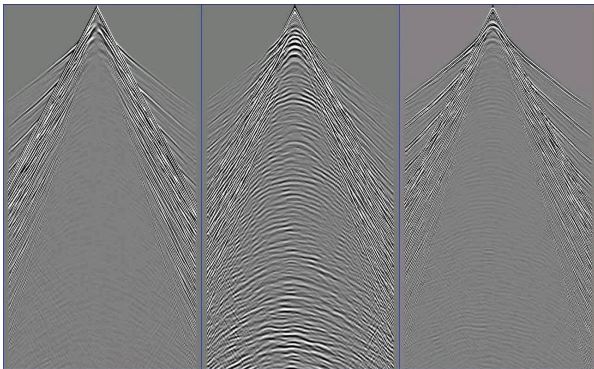


Figura 4 – Sismogramas registrados ao longo da direção X, passando sobre o ponto de aplicação da fonte sísmica referente as componentes do deslocamento da partícula nas direções X (a), Y (b) e Z (c).

Destaca-se que, nesta simulação – considerando todo o modelo de velocidades – empregaram-se 243 processadores em 122 *hosts*. Requerendo um total de aproximadamente 5.2 Gb de memória RAM, tal modelo foi dividido em 9 x 9 x 3 partições, e teve um tempo de execução aproximado de 18 horas, quando simulado empregando-se microcomputadores *Duais Xeon 2.8 GHz* interligados com rede de 1 Gb/s.

Na segunda etapa da análise planejou-se a simulação do levantamento sísmico, nos quais os dados seriam adquiridos em um *swath 3D* posicionado ao longo da direção X do modelo de velocidades, empregando-se os mesmos parâmetros expostos na tabela 1 e um tempo total de registro de 3.0 segundos. Na figura 5 ilustra-se o dispositivo fixo de aquisição adotado, além de outros parâmetros utilizados.

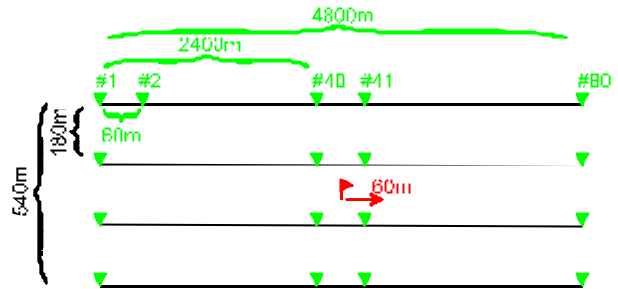


Figura 5 – Dispositivo de aquisição empregado no levantamento de um *swath 3D* posicionado ao longo da direção X do modelo de velocidades.

Com a adoção de tais parâmetros, tem de se realizar um total de 185 modelagens, considerando-se um intervalo entre tiros de 60 metros. A fim de reduzir a demanda computacional e o tempo de execução, foi feito um corte no modelo de velocidades original, reduzindo-o de tal forma a ter-se 1693 x 201 x 401 pontos do *grid* (vide figura 6).

Destaca-se que, cada uma das simulações empregou 6 processadores em 3 *hosts* (divido em 3 x 1 x 2 partições), tendo em média um tempo de execução de 5.5 horas empregando-se o mesmo *cluster* utilizado na primeira etapa desta análise. Para gerenciar a execução destas 185 simulações no *cluster* de microcomputadores empregou-se o programa desenvolvido de gerenciamento de tarefas denominado *Master\_SISMOS*.

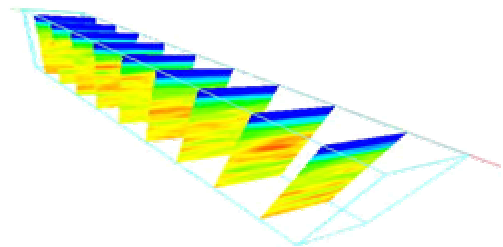


Figura 6 – Ilustração de determinados planos de corte sobre o modelo de velocidades empregado na simulação do levantamento sísmico adquiridos em um *swath 3D*.

A seguir, na figura 7 representam-se determinados planos de corte em um sismograma referente a componente de deslocamento na direção Z, considerando que a fonte sísmica está posicionada a 350 metros da borda esquerda do modelo de velocidades. Tal figura é apresentada apenas com o intuito de ilustrar o tipo de resposta sísmica possíveis de serem obtidas com tais modelagens elásticas tridimensionais, simulando os principais eventos presentes na propagação de ondas



elásticas, como por exemplo, as ondas primárias, múltiplas e principalmente conversão entre os diferentes modos de ondas.

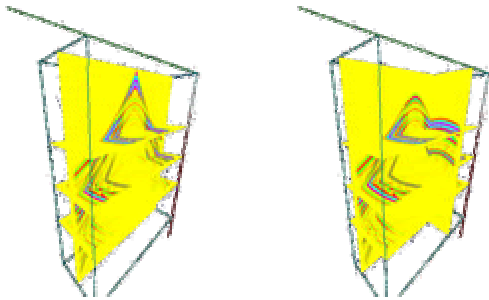


Figura 7 – Planos de corte em um sismograma referente a componente de deslocamento na direção Z.

A seguir, na figura 8, apresenta-se uma série de resultados, obtidos empregando-se diversos esquemas de Modelagem Sísmica, como por exemplo: Traçamento de Raios (TR), Diferenças Finitas empregando operadores acústicos 2D e elásticos 2D e 3D, além do dado sísmico real. Tais resultados podem ser empregados para se obter um padrão de comparação

com o dado sísmico real.

Observando os resultados apresentados na figura 8, comparando-se os diversos esquemas de modelagem sísmica, primeiramente observa-se como o dado sintético reproduz razoavelmente as principais feições presentes no dado real. Numa gradação que começa com o traçamento de raio, a modelagem acústica 2D e finalmente a modelagem elástica 2D e 3D, observa-se – respectivamente – apenas a presença de reflexões primárias P, primárias mais múltiplas P e finalmente primárias e múltiplas P e S e conversões entre os diferentes modos de ondas P e S.

Ressalta-se, pelos resultados apresentados na figura 8, como se torna difícil no sismograma oriundo da modelagem elástica 3D a identificação visual das ondas primárias. Há um grande número de eventos, que obliteram a identificação dos eventos das ondas primárias. Esses eventos não são apenas reflexões, há também refrações e possíveis reflexões laterais, que contaminam a maior parte do sismograma, e precisam ser atenuados ou eliminados no processamento.

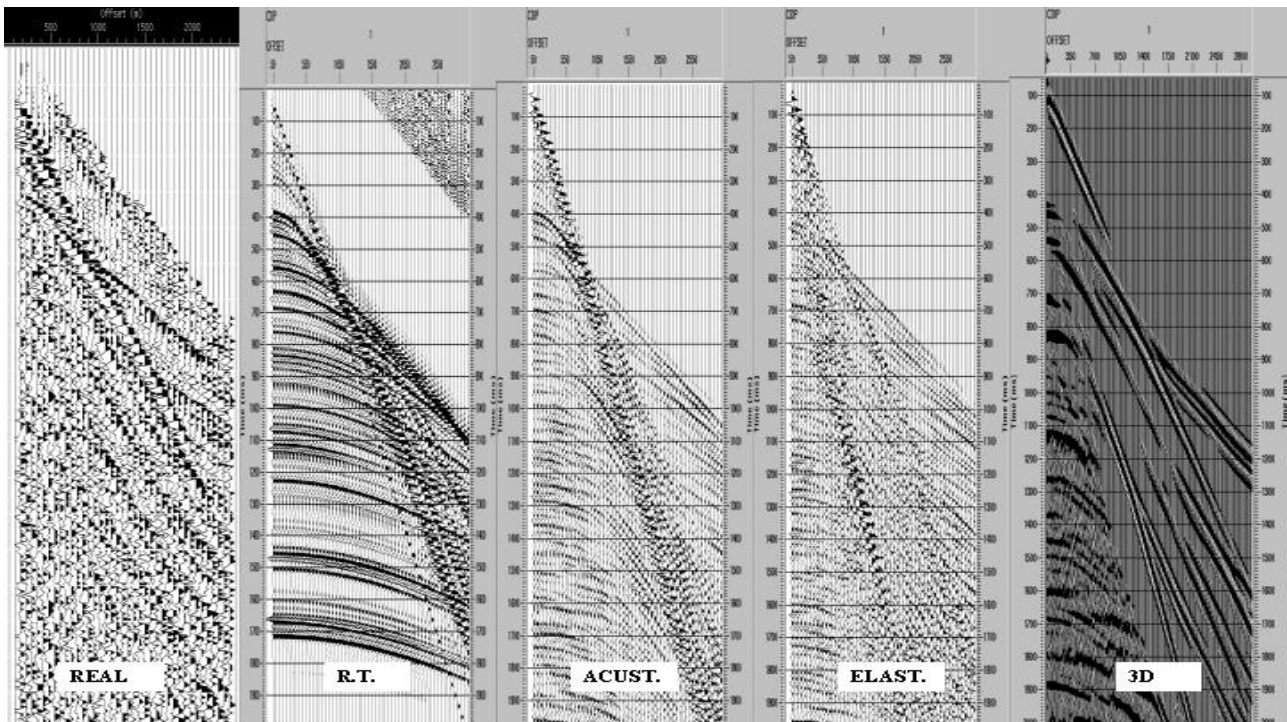


Figura 8 – Sismogramas representando a comparação entre o dado sísmico real (REAL), modelagens de dados de poço 2D por traçamento de raios (R.T.), diferenças finitas empregando operadores acústicos 2D (ACUST.), operadores elásticos 2D (ELAST.) e através da metodologia exposta neste trabalho: Modelagem Elástica 3D via Método das Diferenças Finitas (3D).

Finalmente, o último passo executado na comparação entre o dado sísmico real e o sintético (oriundo da modelagem elástica 3D) é a apresentação da figura 9, contendo as seções sísmicas empilhadas. Apesar da diferença no conteúdo de frequência, pode-se notar a semelhança entre as seções sísmicas.

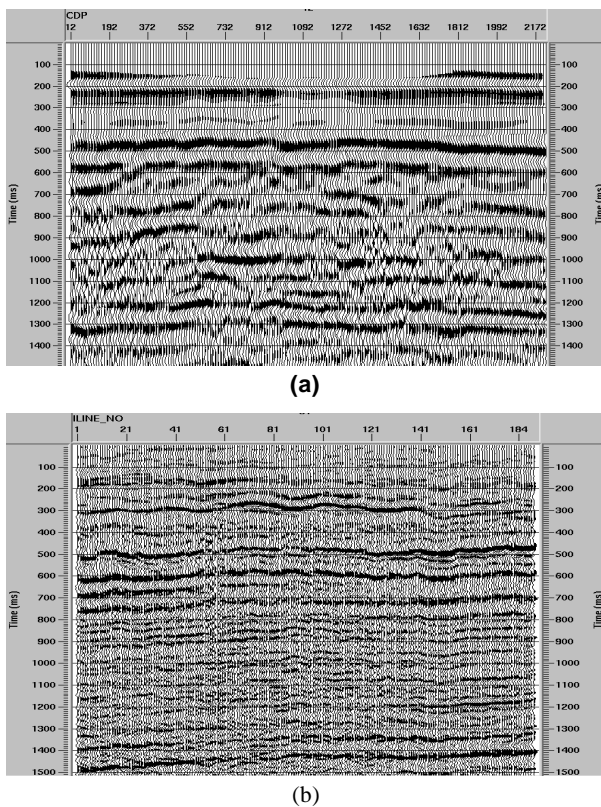


Figura 9 – Seção sísmica empilhada: (a) dado oriundo da Modelagem Elástica 3D; e (b) dado sísmico real.

### Conclusões

Neste trabalho, o principal foco se deu na aplicação da simulação numérica dos problemas relacionados à propagação de ondas sísmicas, empregando-se um dos principais modelos matemáticos adotados na Modelagem Sísmica, regido pela Equação Elástica da Onda, onde se tem a presença e a interação de diversos modos de ondas, dentre elas as ondas compressoriais ( $P$ -waves) e as ondas cisalhantes ( $S$ -waves).

O emprego de *clusters* de microcomputadores, aliado à utilização dos recursos do processamento em paralelo nos programas desenvolvidos, mostrou-se uma estratégia eficaz para obtenção do poder computacional necessário para aplicação da metodologia de Modelagem Sísmica 3D, considerando-se os casos afetos à Geofísica e voltados à indústria petrolífera.

De acordo com os resultados apresentados e adotando-se a estratégia exposta, espera-se ter demonstrado a viabilidade do emprego das técnicas de Modelagem Sísmica – mesmo no caso da adoção de modelos elásticos tridimensionais (3D) – para geração de dados para avaliação de parâmetros de aquisição de dados sísmicos e processamentos sísmicos especiais.

Neste trabalho – considerando sua aplicação em um modelo geológico similar ao existente na bacia amazônica – observou-se que, no processamento dos resultados advindos da modelagem elástica 3D é possível identificar alguns dos principais problemas que

afetam a qualidade dos dados sísmicos reais. O principal deles é a presença marcante da energia das reflexões múltiplas e, secundariamente, a presença de eventos lineares.

Espera-se que uma vez identificados os principais fatores que comprometem a qualidade do dado sísmico, poderão ser definidas as melhores estratégias a serem empregadas no processamento dos mesmos.

### Referências

- BERKHOUT, A.J., *Seismic Migration, Imaging of Acoustic Energy by Wave Field Extrapolation*, 1<sup>st</sup> Ed., New York, Elsevier, 1984.
- BRAGANÇA, R.S.N.de; BULCÃO, A.; SOARES FILHO, D.M.F.; MANSUR, W.J.; 3-D Seismic Modeling in Clusters – Performance Analysis, 7<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2001.
- BULCÃO, A., Modelagem e Migração Reversa no Tempo Empregando Operadores Elásticos e Acústicos, *Tese de Doutorado* – Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEC/COPPE, 2004.
- BULCÃO, A., SOARES FILHO, D.M., MANSUR, W.J., BRAGANÇA, R.S.N., “Modelagens Acústicas 2D e 3D em Paralelo: Análise do Desempenho Computacional”, XXI CILAMCE – Iberian Latin-America Congress on Computational Methods in Engineering, UNICAMP, 2001.
- EWING, R.; SHARPLEY, R.; MITCHUM, D.; OLEARY, P., SOCHACKI, J.; Distributed Computation of Wave Propagation Models Using PVM; *IEEE Parallel & Distributed Technology*, 2, p. 26-31, 1994.
- LEVANDER A.R.; Forth-order Finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, 53, p. 1425-1436, 1988.
- MYCZKOWSKI, J.; McCWAN, D.; MUFTI, I.; Finite-Difference Seismic Modeling in Real Time, *Geophysics*, TheLeading Edge, 6, p. 49-52, 1991.
- VIRIEUX, J., 1984, “SH Wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-Stress Finite Difference Method”, *Geophysics*, v. 49, pp. 1933-1937.
- VIRIEUX, J., 1986, “P-SV Wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-Stress Finite Difference Method”, *Geophysics*, v. 51, pp. 889-901.