



Modelagem sísmica por diferenças finitas – um exemplo da Bacia do Solimões

Charles C. A. Lima*, German Garabito - Centro de Geociências, CPGf/UFGA, Jaime F. Eiras - UFPA/ANP, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th 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.

Abstract

A lot of difficulties are found in the exploration of oil and gas in Amazon area, where the diabase sills represents, in most of the cases, an important villainous, although it is already known the existence of important hydrocarbon reservoirs where the hole of the action of magmatic events represented by the sills was crucial in the process of maturation of organic matter. The diabase sills reached all our Paleozoic basins practically, with prominence for Amazon and Solimões basin, where such event, registered as Penatecaua, it is attributed to the opening of North Atlantic Ocean in the Juro-Triassic time and it was responsible for the injection of hundreds of thousands of cubic kilometers of magmatic material in these basins. The fact of such sills being frequent in the Amazon area hinders the seismic exploration, because the diabase disturbs the sign, and generates multiple and spherical divergence, increasing the exploratory risk in these areas. In the present work a geophysical modeling will be presented using the finite differences technique, based on a synthetic model of a time-migrated seismic section obtained in the Solimões Basin. A geological model in depth, interpreted from the seismic section, will give support to the geophysical model. As a result, multiple covering seismic data will be produced, that will be used to test different methods of seismic processing and to obtain a better image of the geological structures of these situations.

Introdução

A região amazônica é um verdadeiro desafio para as empresas de processamento sísmico, tendo em vista as dificuldades encontradas na exploração de petróleo nesta região. As soleiras de diabásio representam boa parte destes problemas, embora se conheçam grandes reservas de óleo e gás onde a ação de eventos magmáticos, como a das intrusões básicas, foi crucial no processo de maturação da matéria orgânica.

O fato é que as soleiras são freqüentes na região amazônica, o que dificulta a exploração sísmica pois o diabásio perturba o sinal, gera múltiplas e divergência esférica, aumentando o risco exploratório nestas áreas.

Sob o ponto de vista petrolífero, a Bacia do Solimões é a mais importante de nossas bacias paleozóicas por

diversos motivos. É, atualmente, a única bacia paleozóica brasileira com produção comercial de petróleo. É a terceira maior produtora de óleo e contém, até o momento, o segundo maior volume de óleo-equivalente recuperável do Brasil (Eiras & Menezes, 2000). Além disso, cerca de 25% das reservas brasileiras de gás natural estão concentradas nessa bacia.

No presente trabalho é apresentado o resultado de uma modelagem sísmica utilizando-se da técnica de diferenças finitas, num modelo sintético construído com base numa seção sísmica migrada no tempo, obtida na Província Petrolífera do Urucu, Bacia do Solimões. A seção em questão foi adquirida numa área onde é sabida a ocorrência de volumes comerciais de óleo e gás natural sendo, portanto, uma boa motivação geológica para o presente estudo.

Um modelo geológico em profundidade, interpretado a partir da seção sísmica, foi utilizado como suporte ao modelo geofísico. Como produto, foram gerados dados sísmicos com cobertura múltipla, num total de 201 *shots*, que servirão para serem testados em técnicas convencionais de processamento, como o método de empilhamento CMP, e não convencionais, tais como o empilhamento CRS, visando obter um melhor imageamento da subsuperfície e controle dos problemas de modelagem e processamento deste tipo de dado.

Os refletores que separam os pacotes sedimentares de interesse para a modelagem, bem como as soleiras de diabásio e o embasamento, foram identificados com o auxílio de dados de poço, perfis de raios gama e sônico.

A confecção de sismogramas sintéticos foi realizada através do programa de diferenças finitas FDSKALAR (Sandmeier & Liebhart, 1992).

A Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões está localizada 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 (figura 1). Ocupa cerca de 450.000 km² e possui forma aproximadamente elipsoidal, com eixo principal orientado na direção E.N.E.-O.S.O. (Eiras, 1998).

A Bacia do Solimões pode ser dividida em duas sub-bacias, separadas pelo arco estrutural de Carauari: Sub-bacia do Jandiatuba e Sub-bacia do Jurua (figuras 1 e 2).

Essa área sedimentar está hoje totalmente coberta pela floresta tropical amazônica. As rochas paleozóicas e mesozóicas não afloram em superfície, enquanto que os afloramentos de rochas terciárias e quaternárias estão

restritos aos barrancos dos grandes rios. Esses fatores somados fazem com que o estudo dessa bacia fique totalmente dependente da aquisição de dados geofísicos e geológicos de subsuperfície.

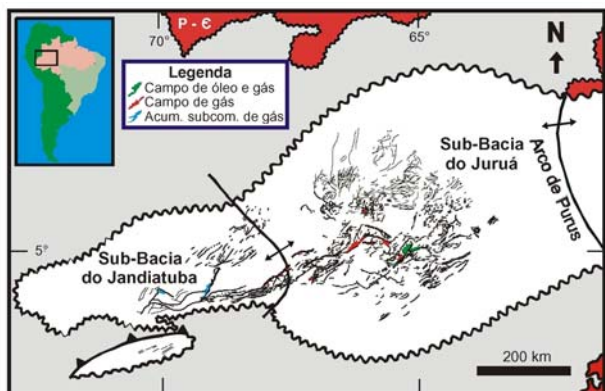


Figura 1 – Mapa de localização e estrutural da Bacia do Solimões (modificado de Bender *et al.*, 2001).

As rochas paleozóicas estão intrudidas por diques e soleiras de diabásio (figura 2), as quais controlaram fortemente a evolução térmica da matéria orgânica contida na rocha geradora devoniana e o tipo de petróleo acumulado na rocha-reservatório carbonífera.

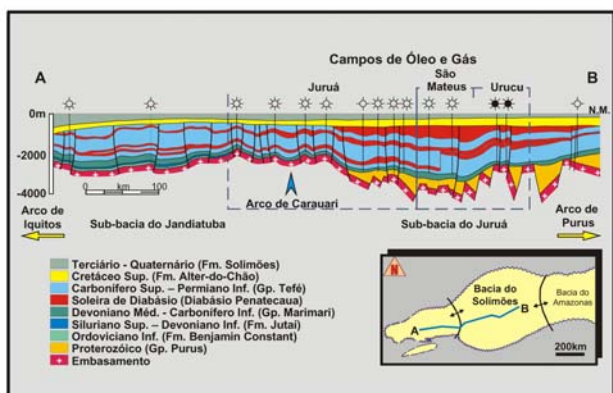


Figura 2 – Seção geológica regional da Bacia do Solimões. Observe que as soleiras possuem continuidade em toda a bacia (Eiras *et al.*, 1996).

As soleiras de diabásio ocorrem em todas as nossas bacias paleozóicas, com destaque para as bacias do Amazonas e Solimões, onde tal evento, denominado como Penatecaua, é atribuído à abertura do Atlântico Norte no juro-triássico e foi responsável pela injeção de centenas de milhares de quilômetros cúbicos de material magmático nestas bacias. Três grupos de soleiras com espessura superior a 150 metros cada foram intrudidas em camadas argilosas, acompanhando grosseiramente os planos de estratificação (Eiras, 1999).

Entretanto, sob o ponto de vista exploratório, a presença de rochas magmáticas no interior de bacias sedimentares pode deteriorar a qualidade das seções sísmicas porque causa perda do sinal, formação de múltiplas e divergência esférica, e pode prejudicar a interpretação

dos dados pela formação de falsas estruturas devido ao efeito de *pull-up ou pull-down* (Eiras, 2002).

Seção geológica interpretada

A motivação geológica da presente modelagem é uma seção sísmica migrada no tempo, obtida na Província Petrolífera do Urucu (figura 3).

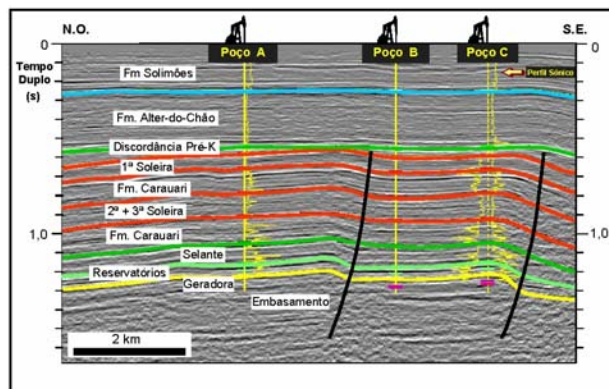


Figura 3– Seção sísmica interpretada, migrada no tempo. Os principais refletores foram identificados com auxílio de dados de poço, perfis de raios gama e sônico nos poços A e C (Modificado de Lima, 2001).

Foram selecionadas na seção 8 camadas de rochas sedimentares (unidades A, B, C, D, E e F), 3 soleiras de diabásio (S1, S2 e S3), mais o embasamento (figura 4). A composição litológica considerada para cada camada foi baseada no trabalho de Eiras *et al.*, 1994.

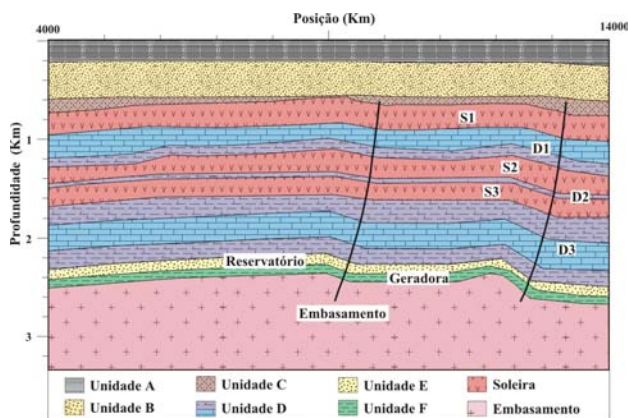


Figura 4 – Modelo geológico confeccionado a partir da interpretação da seção sísmica migrada no tempo.

A rocha geradora desta seção é o folhelho da unidade F; a rocha-reservatório, o arenito da unidade E, e a selante, os evaporitos da unidade D, subdivisão D3.

Na seção sísmica foram interpretadas duas falhas reversas com grande desnível entre os blocos alto e baixo. Entretanto, o rastreamento dos horizontes sísmicos não foi dificultado por essas falhas, já que os rejeitos nos planos das mesmas são pequenos, com boa continuidade dos refletores de um bloco a outro. Deste

modo, as falhas não foram levadas em consideração na modelagem.

Modelo de velocidades

A modelagem de dados sísmicos necessita de uma abstração matemática que consiste na representação da distribuição de velocidades dos estratos em subsuperfície.

Partindo-se da seção geológica interpretada da seção sísmica (figura 4), foi possível confeccionar um modelo de velocidades necessário à modelagem. Tal modelo é ilustrado na figura 5.

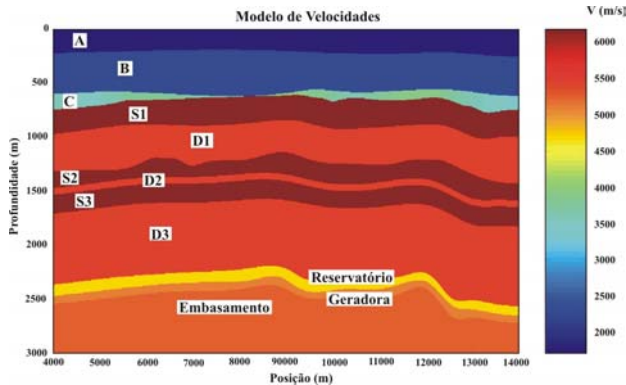


Figura 5 – Modelo de velocidades gerado a partir dos dados do modelo geológico, dados de poços da região e dos registros de perfis A e B obtidos na seção.

Modelagem sísmica

Uma melhor compreensão da propagação da onda em meios geologicamente complexos tem sido obtida através da técnica de diferenças finitas e, à medida que os computadores aumentam seu poder de processamento, esta técnica vem sendo cada vez mais difundida.

A idéia básica sobre o método de diferenças finitas é a substituição das derivadas parciais por aproximações baseadas na expansão das séries de Taylor de funções próximas ao ponto de interesse. As diferenças das aproximações para frente e para trás das derivadas do tempo (Smith, 1985) levam a esquemas de diferenças finitas explícitos e implícitos, respectivamente. Esquemas explícitos querem dizer que o campo de onda no tempo presente é computado a partir do campo de onda do tempo passado. Já nos esquemas implícitos, o valor presente depende do valor passado e futuro. Diferentemente dos métodos explícitos, os métodos implícitos são incondicionalmente estáveis, mas levam a altos custos de tempo computacional devido à necessidade da realização de inversões de matrizes enormes. Em geral, a formulação diferencial da equação da onda é resolvida com algoritmos explícitos, desde que o passo de tempo seja determinado com critério de precisão em lugar de critério de estabilidade (Emerman *et al.*, 1982).

O esquema implícito é mais complexo computacionalmente. Por esta razão, o método explícito é mais comumente utilizado.

Ao longo dos últimos anos, vem se definindo uma tendência em utilizar aproximações de diferenças finitas de quarta ordem em relação às de segunda ordem. Isto porque os esquemas de quarta ordem apresentam maior precisão que os de segunda ordem.

A presente modelagem foi feita com a técnica de diferenças finitas na aproximação de soluções de equações da onda no tempo e no espaço, usando um esquema explícito de quarta ordem (tanto no tempo quanto no espaço).

Dispersão numérica e estabilidade

O método de diferenças finitas (DF) produz resultados precisos para modelos contendo pontos difratores, desde que o *grid* seja suficientemente pequeno. O uso da precisão de quarta ordem ou ordem mais alta das aproximações de diferenças finitas para as derivadas espaciais é um meio estabelecido de redução da amostragem espacial, para simular com precisão a propagação da onda nos esquemas de DF.

Para um modelo acústico bidimensional (2-D), onde a densidade do meio é considerada constante e a velocidade de propagação da onda varia com o tempo no modelo (caso do presente trabalho), a condição de estabilidade para o esquema de quarta ordem é dada por (Lines *et al.*, 1999):

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{\Delta x}{v_{\max}} \quad (1)$$

sendo Δt o intervalo de amostragem no tempo, Δx o intervalo da malha regular, e v_{\max} a velocidade máxima no modelo.

Desta forma, as taxas de amostragem de tempo e espaço não podem ser escolhidas independentemente. Geralmente, operadores de diferenças finitas necessitam de muito mais amostras que o critério de Nyquist de dois por comprimento de onda. Tecnicamente isto é atribuído ao fato de que os operadores ocasionam uma dispersão chamada *dispersão de grid*. Esta dispersão afeta preferencialmente os comprimentos de onda mais curtos. Portanto, uma maior amostragem reduz a dispersão.

Na construção de um modelo geralmente se conhece uma variação de frequência temporal desejada. Então, o comprimento de onda mínimo (λ_{\min}) é obtido por: $\lambda_{\min} = v_{\min}/f_{\max}$, sendo v_{\min} a velocidade mínima do modelo e f_{\max} a frequência máxima do sinal sísmico. Então, a taxa de amostragem espacial pode ser escolhida a fim de se obter um número desejável de amostras (n) por comprimento de onda, isto é: $\Delta x = \lambda_{\min}/n$. Isto implica que o espaçamento não pode exceder metade do menor comprimento de onda a fim de se evitar o efeito de *aliasing* (divisão indesejada dos *pixels* em forma de

escada que prejudica a imagem). O espaçamento de *grid* atual depende do esquema escolhido. Finalmente, a taxa de amostragem temporal é escolhida visando a estabilidade.

Condições de absorção de borda

As bordas da malha numérica podem produzir artefatos não físicos os quais provocam distúrbios dos eventos físicos. Tais artefatos são reflexões das bordas.

Devido ao poder de processamento finito dos computadores, a resolução do problema da propagação de onda por diferenças finitas só é possível de ser obtida para um número finito de pontos, introduzindo desta forma bordas artificiais no modelo que produzem eventos espúrios indesejáveis, como as reflexões de borda, e que devem ser amenizadas.

Para este trabalho foram introduzidas as condições de absorção de Reynolds (1978) para que houvesse a absorção das reflexões de borda, preservando a precisão dos dados gerados.

Planejamento da modelagem

A modelagem de sismogramas sintéticos pode ter diferentes fins, como por exemplo, para simular um experimento sísmico, para auxiliar na interpretação estrutural, ou para executar uma análise sensível relacionada à detecção de uma variável petrofísica, como a porosidade, tipo de fluido, saturação de fluido, etc. algoritmos de modelagem também podem ser parte de algoritmos de inversão e migração.

Quanto mais complexo for o modelo considerado, maior é a quantidade de variáveis envolvidas e menores são as chances de se obter uma modelagem planejada. No entanto, sugere-se que algumas medidas sejam tomadas para uma modelagem por DF:

1. A partir da máxima frequência da fonte e mínima velocidade do modelo, encontrar os limites de espaçamento de *grid*, conforme o item *dispersão numérica e estabilidade*. Neste trabalho foi utilizado um esquema de DF de quarta ordem no tempo e espaço e aproximadamente 6 pontos de *grid* por comprimento de onda, ou seja, para $v_{min}=1750 \text{ m/s}$ e $f_{max}=2,5*f_d$. Sendo $f_d=50 \text{ Hz}$ a frequência dominante do sinal sísmico, foi estimado um valor de $\Delta x \cong 2,5 \text{ m}$.

2. Determinar o número de pontos do *grid* a partir do modelo. Determinar o número de pontos do *grid* a partir do modelo. O modelo da presente modelagem possui 18km e 6881 pontos na horizontal, 3km e 1601 pontos na vertical.

3. Escolher o intervalo de amostragem no tempo de acordo com a condição de estabilidade (1) e critério de precisão. Considerando a velocidade máxima do modelo $v_{max}=6150 \text{ m/s}$ e o espaçamento do *grid* $\Delta x = 2,5 \text{ m}$, foi estimado um $\Delta t = 0,25 \text{ ms}$.

Aquisição

A linha sísmica, ao longo da qual foi realizada a aquisição de seções tiro-comum, tem orientação N.O.-S.E. O primeiro e o último tiro estão localizados nas posições 4.0Km e 14.0Km, medidos sobre a linha sísmica a partir da borda noroeste do modelo. A distância entre fontes consecutivas é de 50m, gerando-se um total de 201 seções fonte-comum. Foi usado uma fonte de pressão bidimensional (fonte Linha) com um *wavelet* definido pela função Fuchs-Mueller.

O tipo de arranjo de cada experimento tiro-comum é simétrico (*split spread*), estando composto por 144 geofones, com um intervalo constante entre geofones consecutivos de 50m. O afastamento máximo em valor absoluto entre a fonte e o último geofone é de 3600m.

Visualização dos resultados

Para a geração dos *snapshots* e dos dados sísmicos de cobertura múltipla foi usado o programa de modelagem sísmica baseada no método de diferenças finitas, desenvolvido na Universidade de Karlsruhe na Alemanha por Sandmeier & Liebhart (1992), com aproximação de quarta ordem da equação da onda no espaço e no tempo.

Os *snapshots* das figuras 7-10 mostram a propagação da onda no meio em diferentes instantes. Nestes gráficos observa-se o campo de onda completo (ondas diretas, ondas refletidas, múltiplas, etc.) que se propagam nas diferentes camadas do modelo.

Na figura 11 temos um exemplo do conjunto de dados sísmicos gerados. Nesta, mostra-se uma seção sísmica fonte-comum simétrica, com a fonte localizada na posição 9km. Tal seção possui 145 traços sísmicos com um intervalo de 50m. O intervalo de amostragem no tempo é de 4 ms, que resulta da re-amostragem a partir dos dados modelados (com um intervalo de amostragem da modelagem que foi de 0,25 ms). Nesta seção, observa-se o registro do campo de onda completo com uma boa definição (i.e., alta razão sinal/ruído), o qual acontece mesmo nos tempos longos onde sinais espúrios associados ao processo numérico ganham maior amplitude.

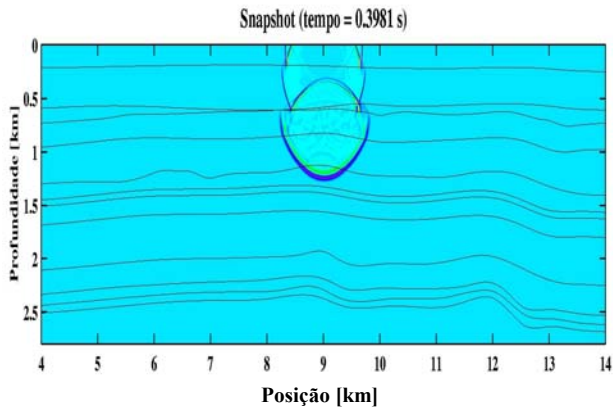


Figura 6 – snapshot de propagação da onda para o instante $t=0,3981s$. Note que quase não há distinção entre as reflexões correspondentes a primeira soleira e a discordância devido estarem praticamente em contato no centro do modelo.

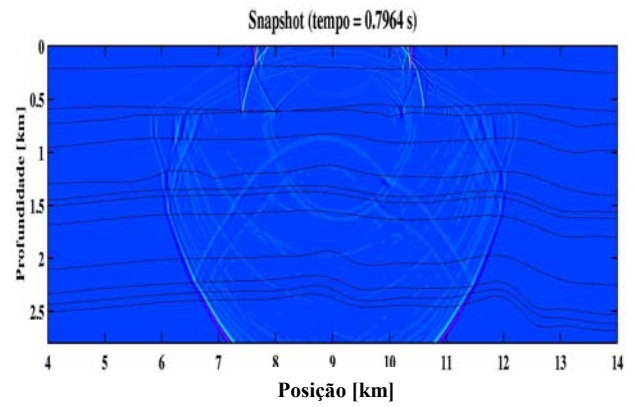


Figura 9 – snapshot de propagação da onda para o instante $t=0,6636s$. observa-se uma boa reflexão no nível do reservatório e uma fraca reflexão no nível da rocha geradora, devido o baixo contraste de velocidade que existe entre ambas.

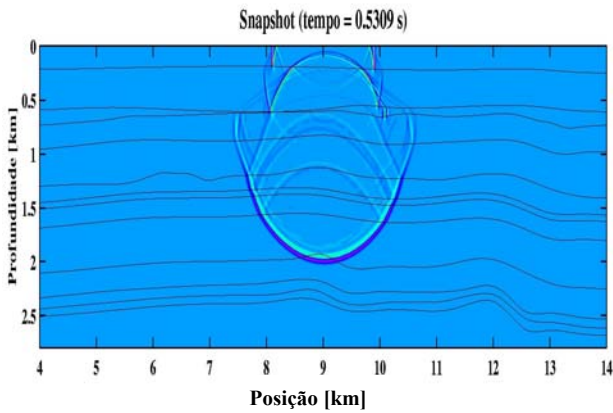


Figura 7 – snapshot de propagação da onda para o instante $t=0,5309s$.

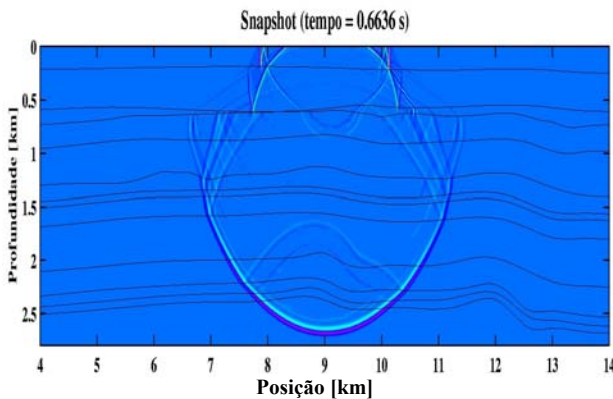


Figura 8 – snapshot de propagação da onda para o instante $t=0,6636s$. Nota-se o início das reflexões do reservatório e da geradora.

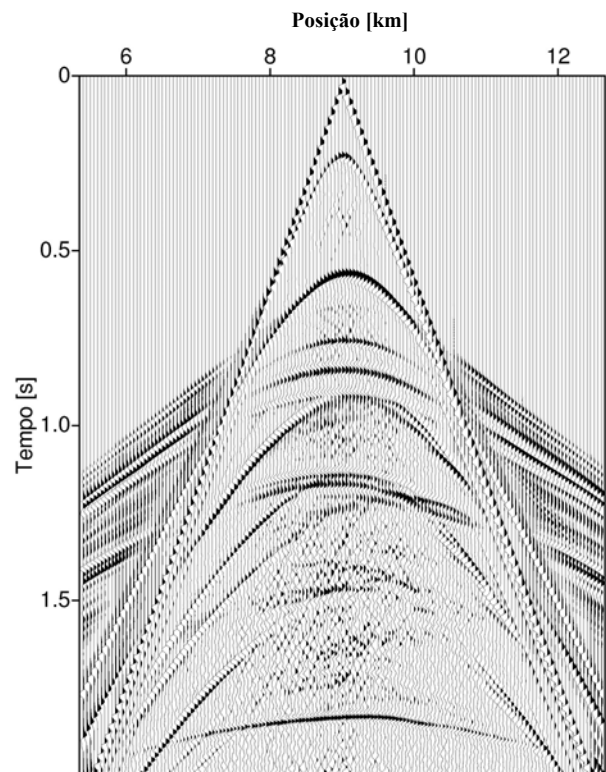


Figura 10 – Seção sísmica fonte-comum simétrica com fonte na posição 9Km (centro do modelo), composta por 145 traços sísmicos com intervalo de 50m. Foi aplicado um ganho automático (AGC) com uma janela de 0,3s. O intervalo de amostragem no tempo é de 0,004s.

Conclusões e perspectivas

Este trabalho apresenta os resultados de uma etapa preliminar que compreende a geração dos dados sísmicos, ou seja, a interpretação das seções, confecção dos modelos e a modelagem propriamente dita. Numa segunda etapa, estes dados serão processados e comparados com dados reais da região (seção sísmica) como forma de averiguar a consistência dos dados gerados.

O modelo geológico utilizado neste estudo foi baseado numa seção sísmica de reflexão adquirida na província do Urucu. Procura-se, com a geração destes dados, entender melhor a influência das soleiras de diabásio na resposta sísmica dos dados adquiridos.

O modelo de velocidades confeccionado a partir do modelo geológico é de boa representatividade, embora não se dispusesse de *softwares* utilizados pela indústria, bem como de informações precisas acerca do modelo de velocidades, estratigrafia e estrutural da área de estudo. A interpretação da seção sísmica e a conversão tempo-profundidade foi feita de forma satisfatória, considerando-se esta metodologia.

Embora tenha sido identificada a presença de duas falhas reversas na interpretação da seção sísmica, estas não foram consideradas na presente modelagem. Isto se deve ao fato de que apresentam um rejeito que não perturba a continuidade dos horizontes sísmicos. No entanto, observa-se uma leve flexura dos estratos ao longo do plano das falhas, ocasionando dobramento dos horizontes.

Os *snapshots* gerados mostram a propagação da onda no modelo e a geração dos diferentes tipos de ondas (reflexões, múltiplas) associadas às diferentes camadas que compõem o modelo, tornando-se, portanto, um resultado útil para entender o campo de onda registrado com as configurações fonte-comum e as posteriores imagens que resultarão do imageamento sísmico.

Na seção fonte-comum mostrada, observa-se que os campos de ondas gerados são de boa qualidade. No entanto, para remover os efeitos de dispersão numérica, será aplicado um filtro passa baixa (10, 12, 50, 60Hz). Os dados sísmicos de cobertura múltipla gerados podem ser utilizados por métodos de imageamento sísmico, a fim de se produzir imagens representativas deste quadro geológico.

Os efeitos negativos, como os de *pull-up ou pull-down*, decorrentes da intrusão de soleiras de diabásio em bacias sedimentares como a Bacia do Solimões podem ser mais bem entendidos quando analisados através de processos de inversão e modelagem sísmica que ajudem na aplicação de técnicas não-convencionais de processamento.

Finalmente, para realizar estudos sobre a complexidade litológica e estrutural deste tipo de contexto geológico, com base em imagens sísmicas, os dados sísmicos gerados a partir deste modelo sintético representativo devem ser processados por diferentes técnicas,

convencionais e não-convencionais, de imageamento sísmico.

Referências

- Bender, A. A., Eiras, J. F., e Wanderley F^o, J. R.**, 2001, Quantificação 3D da evolução termal da Bacia do Solimões e suas implicações petrolíferas. *In*: VII Simpósio de Geologia da Amazônia. Workshop III: Petróleo e Gás Natural da Amazônia. Belém-PA, 2001.
- 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.**, 1994, Bacia do Solimões. *Boletim de Geoc. da Petrobras*, n^o1, vol.8, 1994, p. 17-45.
- Eiras, J. F.**, 1996, Influência tectônica do arco de Carauari na sedimentação fanerozóica da Bacia do Solimões, Norte do Brasil. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, 1996, Salvador. Anais... Salvador : SBG – Núcleo Bahia-Sergipe, p. 50-53.
- Eiras, J. F.**, 1998, 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.
- Eiras, J. F.**, 1999, Geologia e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões. *In*: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Manaus. *Boletim de Resumos Expandidos*. Belém : SBG – Núcleo Norte, p. 30-32.
- Eiras, J. F., Menezes, J. R. C.**, 2000, Petroleum exploration in the Solimões Basin. *In*: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro. Abstracts Volume (CD Rom). Rio de Janeiro : CPRM.
- Eiras, J. F., Wanderley F^o**, 2002, 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.
- Emerman, S. H., Schmidt, W., and Stephen, R. A.**, 1982, An implicit finite-difference formulation of the elastic wave equation. *Geophysics*, 47, 1521-1526.
- Lima, C. C. A., Garabito, G., e Eiras, J. F.**, 2002. Modelamento sísmico por diferenças finitas num modelo representativo da Bacia do Solimões. *In*: Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados, 2, *Boletim de Resumos e Roteiro da Excursão*, Belém, Núcleo PRONEX do Centro de Geociências da UFPA, p.58.
- Lima, H. P.**, 2001, Petróleo e Gás Natural na Amazônia. *In*: Seminário: Potencial Econômico e Tributário da Amazônia, p.230-248, Belém-PA.
- Lines, L. R., Slawinski, R., and Bording, R. P.**, 1999, A recipe for stability of finite-difference wave-equation computations: *Geophysics*, 64, 967–969.
- Reynolds, A. C.**, 1978, Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems. *Geophysics*, 43, 1099-1110.
- Sandmeier, K. J., Liebhardt, G.**, 1992, Software Refra. Geophysical Institute of Karlsruhe University. Germany.
- Smith, G. D.**, 1985, Numerical Solution of partial differential equations: Finite difference methods, Clarendon Press.