UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CLÁUDIA PRISCILA PEREIRA NAZARÉ

PROCESSAMENTO SÍSMICO CMP E CRS DE DADOS SINTÉTICOS ACÚSTICOS E ELÁSTICOS REPRESENTATIVOS DAS BACIAS PALEOZÓICAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

BELÉM- PARÁ
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

CLÁUDIA PRISCILA PEREIRA NAZARÉ

PROCESSAMENTO SÍSMICO CMP E CRS DE DADOS SINTÉTICOS ACÚSTICOS E ELÁSTICOS REPRESENTATIVOS DAS BACIAS PALEOZÓICAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração:
Métodos Sísmicos

Orientador: Dr. German Garabito Callapino
Co-orientador: Dr. Jessé Carvalho Costa

BELÉM-PARÁ
2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Nazaré, Cláudia Priscila Pereira

N335p Processamento sísmico CMP e CRS de dados sintéticos acústicos e elásticos representativos das Bacias Paleozóicas da região Amazônica / Cláudia Priscila Pereira Nazaré**;** Orientador, German Garabito Callapino; Co-orientador, Jessé Carvalho Costa. – 2007

100f.: il.

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2007.

1. Empilhamento Sísmico SRC. 2. Dados Acústicos. 3. Dados Elásticos. 4. Bacias Paleozóicas. I. Universidade Federal do Pará. II. Garabito Callapino, German, Orient. III. Costa, Jessé Carvalho, Co-orient. IV. Título.

CDD 20º ed.622.1592:

CLÁUDIA PRISCILA PEREIRA NAZARÉ

PROCESSAMENTO SÍSMICO CMP E CRS DE DADOS SINTÉTICOS ACÚSTICOS E ELÁSTICOS REPRESENTATIVOS DAS BACIAS PALEOZÓICAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

BANCA EXAMINADORA:

UFPA Dr. German Garabito Callapino - Orientador

UFPA Dr. Jessé Carvalho Costa - Co-orientador

PETROBRAS Dr. Wander Nogueira de Amorim

Aos meus maiores incentivadores,
Sérgio e Genildes (pais) e Leandro (irmão).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará – como comunidade aberta à pesquisa;

À CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado, fornecendo apoio financeiro durante o desenvolvimento desta dissertação;

Ao Programa de Pós-graduação em geofísica, pela infra-estrutura e apoio fornecido aos discentes;

Ao Prof. Dr. German Garabito Callapino, pelo tema de dissertação proposto e pelas orientações prestadas;

Ao Prof. Dr. Jessé Costa, pelo aceite de co-orientação e pelas sugestões;

Ao Projeto "Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em Alvos Exploratórios" da Rede Cooperativa em Geofísica de Exploração pelo fornecimento de um dos modelos utilizados neste trabalho;

À UN-BSOL/PETROBRAS pelo deferimento do pedido de utilização de um dos modelos utilizado neste estudo;

Aos Geofísicos, Jorge Fiori Sobreira, Norcírio P. Queiroz e Wander N. de Amorim, pelas informações e sugestões prestadas para o enriquecimento deste trabalho;

À Sra. Benildes Lopes, por toda dedicação, apoio e paciência;

À Roberto Almeida, pelo apóio junto ao Laboratório de Processamento Sísmicos - PROSIS/UFPA;

Aos colegas, Carlos Ferreira, Williams Lima, João Salvatti e Francisco Assis Neto, pela amizade e ajuda computacional;

Aos colegas do Instituto de Geociências, em especial, Sheila Teixeira, Ana Valéria Pinheiro, Alexandre Oliveira, Waldomiro Paschoal Jr., Carlos Sarmento, Disraelli Silva, Iran Gadelha, Charles Lima, Francisco Oliveira e Lidiane Penha, pela cumplicidade e apoio;

Aos meus pais, por sacrificarem suas vidas para que pudessem me proporcionar mais oportunidades e principalmente, por nunca terem deixado de acreditar em mim;

À Pekim Vaz, por me incentivar e principalmente por compreender a minha ausência;

À todas aquelas, que não tiveram os seus nomes aqui citados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

Em especial, à Deus, por mais um objetivo alcançado.

RESUMO

Entre as diversas dificuldades encontradas para a exploração de petróleo na Região Amazônica, as soleiras de diabásio existentes em todas as bacias paleozóicas brasileiras, apesar de terem executado um importantíssimo papel durante o processo de maturação da matéria orgânica, dificultam a exploração sísmica por causarem espalhamento da onda sísmica e gerarem reflexões múltiplas, aumentado assim o risco exploratório. Nesta dissertação é apresentado um estudo dos problemas de imageamento sísmico das Bacias do Amazonas e do Solimões por meio da geração e processamento de dados sintéticos 2D acústicos e elásticos. Para a geração dos dados acústicos e elásticos de cobertura múltipla através da técnica de diferenças finitas foram construídos modelos de velocidades de ondas P e S e de densidades com base em informações geológicas e geofísicas reais. O processamento desses dados sísmicos sintéticos foi realizado com os métodos de empilhamento ponto médio comum (CMP) e superfície de reflexão comum (CRS) onde foram obtidas seções sísmicas de afastamento nulo (ZO), que foram migradas em profundidade pós-empilhamento pelo método *split-step*. Os resultados dos processamentos sísmicos com os métodos CMP e CRS mostram que tanto os dados acústicos como os elásticos representativos de ambas as bacias, exibem uma razão sinal/ruído superior e melhor continuidade lateral dos refletores quando simulados pelo método CRS em relação aos resultados obtidos na simulação realizada através do método CMP. A análise interpretativa das seções empilhadas e migradas em profundidade pós-empilhamento mostra que nos dados aqui estudados, os eventos situados na porção superior dos modelos propostos (em tempo, até 0,7s e em profundidade até 1.200m) apresentam aparentemente uma melhor resolução, porém os eventos situados em porções inferiores (onde se encontra a rocha reservatório) não foram imageados satisfatoriamente devido a ocorrência das reflexões múltiplas que se apresentam por vezes sobrepostas às reflexões primárias.

Palavras-chave: Empilhamento Sísmico CRS. Dados Acústicos. Dados Elásticos. Bacias Paleozóicas.

ABSTRACT

Among the several difficulties found in oil and gas exploration in the Amazon area, the existence of diabase sills, although important to the process of maturation of organic matter in all Brazilian Paleozoic basins, turns difficult the seismic exploration. The diabase disturbs the seismic signal, generating multiple reflections and scathering. With the purpose of understanding the seismic wave propagation and, mainly, the difficulties found by the seismic imaging methods in these complex geological settings, in this work it is presented the results of acoustic and elastic seismic modeling in synthetics models of the Amazonas and Solimões Basin, using finite-differences techniques. I present the seismic processing of this data set by the Common Midpoint (CMP) and Common Reflection Surface (CRS) stacking methods, and the pos-stack depth migration with split-step method. The results of stacking with CRS method show that both acoustic and elastic data has a better signal-noise ratio and lateral continuity of the reflectors when compared with the results of CMP stacking. The interpretative analyzes of stacked and migrated sections show that reflection events located on the top of models (in time until 0.7sec. and in depth until 1.200 meters) present apparently better resolution, but the botton of models has not been satisfactorily imaged by the occurrence of multiple reflections overlapped to primary reflections.

Key-words: CRS Stacking. Acoustic Data. Elastic Data. Paleozoic Basins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1: Mapa de localização da Bacia do Amazonas..... 17

Figura 2-2: Arcabouço estrutural da Bacia do Amazonas..... 18

Figura 2-3: Seção geológica regional da Bacia do Amazonas..... 19

Figura 2-4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas..... 21

Figura 2-5: Mapa de localização da Bacia do Solimões..... 22

Figura 2-6: Mapa de localização e estrutural da Bacia do Solimões..... 24

Figura 2-7: Seção geológica regional da Bacia do Solimões..... 25

Figura 2-8: Carta estratigráfica da Bacia do Solimões..... 27

Figura 2-9: Modelo geológico proposto com base em modelos geológicos gerados interpretados a partir de dados reais da Bacia do Amazonas cedidos ao Projeto "Modelagem Sísmica e Visualização 3-D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios"..... 31

Figura 2-10: Modelo geológico proposto a partir das complexidades apresentadas em estudos anteriores realizados na Bacia do Solimões..... 32

Figura 2-11: Modelos geofísicos gerados a partir do modelo geológico I - Bacia do Amazonas: (a) modelo de velocidade das ondas P; (b) modelo de velocidade das ondas S e (c) modelo de densidade..... 35

Figura 2-12: Modelos geofísicos gerados a partir do modelo geológico II - Bacia do Solimões: (a) modelo de velocidade das ondas P; (b) modelo de velocidade das ondas S e (c) modelo de densidades..... 37

Figura 3-1: Desenho esquemático referente ao tipo de lanço e levantamento utilizado nas aquisições acústicas e elásticas dos modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões, respectivamente..... 41

Figura 3-2: Sismogramas de famílias fonte comum, gerados a partir do modelo I representativo da Bacia do Amazonas, cuja fonte encontra-se na distância de 8.000m. (a) Sismograma acústico; (b) Sismograma elástico. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 44

Figura 3-3: Sismogramas de famílias fonte comum, gerados a partir do modelo II representativo da Bacia do Solimões, cuja fonte encontra-se na distância de 8.000m. (a) Sismograma acústico; (b) Sismograma elástico. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 44

Figura 3-4: Seções *offset* mínimo (150 metros) modeladas com base nas características do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Modelo de velocidades da onda P; (b) Seção acústica; (c) Seção elástica. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s. As setas em amarelo representam os contatos melhor iluminados..... 45

Figura 3-5: Seções *offset* mínimo (150 metros) modeladas com base nas características do modelo II representativo da Bacia do Solimões. (a) Modelo de velocidades da Onda P; (b) Seção acústica; (c) Seção elástica. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s. As setas em amarelo representam os contatos melhor iluminados..... 46

Figura 4-1: Desenho esquemático de um modelo constituído de uma camada com velocidade constante e com uma interface refletora sobre um semi-espaço. (a) configuração CMP, onde os pontos de reflexão dos raios iluminam o mesmo ponto (M) na interface refletora horizontal; (b) pontos de reflexão dos raios iluminando vários pontos na interface refletora inclinada..... 49

Figura 4-2: Fluxograma de processamento sísmico pela técnica de empilhamento CMP aplicado aos dados acústicos e elásticos tanto aos representativos da Bacia do Amazonas como aos da Bacia do Solimões. As linhas pontilhadas em verde e em azul representam os processos realizados na etapa de pré-processamento..... 51

Figura 4-3: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 53

Figura 4-4: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 54

Figura 4-5: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 55

Figura 4-6: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 56

Figura 5-1: Propagação das ondas hipotéticas (a) NIP e (b) Normal em 2D. O raio normal inicia-se em x_0, propaga-se ao longo das camadas, reflete no ponto R e emerge na superfície de medição em x_0. β_0 é o ângulo de emergência do raio normal com a normal à superfície de medição plana. R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura das ondas NIP e N..... 58

Figura 5-2: Modelo composto por três camadas homogêneas, com um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (linha de cor vermelha) (porção inferior). Superfície de cobertura múltipla (linhas de cor azul) correspondente às reflexões da segunda interface (porção superior)..... 61

Figura 5-3: Fluxograma simplificado das etapas do processamento sísmico pela técnica CRS através da estratégia de busca global-local..... 65

Figura 5-4: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 67

Figura 5-5: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 68

Figura 5-6: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 69

Figura 5-7: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s..... 70

Figura 6-1: Seções acústicas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Seção afastamento mínimo (150 m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local..... 73

Figura 6-2: Seções elásticas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Seção afastamento mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local..... 74

Figura 6-3: Seções acústicas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo II representativo da Bacia do Solimões. (a) Seção afastamento mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local..... 75

Figura 6-4: Seções elásticas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo II representativo da Bacia do Solimões. (a) Seção modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local..... 76

Figura 6-5: Modelo de velocidades da onda P suavizado referente ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas..... 79

Figura 6-6: Modelo de velocidades da onda P suavizado referente ao modelo II representativo da Bacia do Solimões..... 79

Figura 6-7: Seções ZO, referentes ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas, processadas pela técnica CMP-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método s*plit-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica..... 80

Figura 6-8: Seções ZO, referentes ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas, processadas pela técnica CRS-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método s*plit-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica..... 81

Figura 6-9: Seções ZO, referentes ao modelo II representativo da Bacia do Solimões, processadas pela técnica CMP-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método s*plit-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica..... 82

Figura 6-10: Seções ZO, referentes ao modelo II representativo da Bacia do Solimões, processadas pela técnica CRS-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método s*plit-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica..... 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Parâmetros utilizados para a geração da seção geológica representativa da Bacia do Amazonas para a modelagem, com base em modelos geológicos gerados interpretados a partir de dados reais da Bacia do Amazonas cedidos ao Projeto "Modelagem Sísmica e Visualização 3-D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios"..... 31

Tabela 2-2: Parâmetros utilizados para a geração da seção geológica representativa da Bacia do Solimões..... 32

Tabela 2-3: Valores de densidade e velocidades das ondas P e S utilizadas para a geração do modelo geofísico I - Bacia do Amazonas..... 34

Tabela 2-4: Valores de densidade e velocidades das ondas P e S utilizadas para a geração do modelo geofísico II - Bacia do Solimões..... 36

Tabela 3-1: Parâmetros utilizados na modelagem e aquisição de dados sísmicos para Modelos I - Bacia do Amazonas e II - Bacia do Solimões..... 43

Tabela 4-1: Principais parâmetros utilizados no pré-processamento e no processamento CMP..... 52

Tabela 5-1: Principais parâmetros utilizados no processamento CRS global-local..... 66

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO** 15

2 **GEOLOGIA DAS BACIAS DO AMAZONAS E DO SOLIMÕES E OS MODELOS SINTÉTICOS** 17

2.1 GEOLOGIA DA BACIA DO AMAZONAS 17

2.1.1 **Arcabouço Estrutural** 17

2.1.2 **Arcabouço Estratigráfico** 18

2.2 GEOLOGIA DA BACIA DO SOLIMÕES 22

2.2.1 **Arcabouço Estrutural** 23

2.2.2 **Arcabouço Estratigráfico** 25

2.3 PROBLEMAS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS 28

2.4 MODELOS SINTÉTICOS PROPOSTOS 29

2.4.1 **Modelo Geológico I - Bacia do Amazonas** 29

2.4.2 **Modelo Geológico II - Bacia do Solimões** 30

2.4.3 **Modelos de Velocidades e de Densidades** 33

3 **DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS** 38

3.1 MODELAGENS ACÚSTICA E ELÁSTICA 2D 39

3.2 GERAÇÃO DOS DADOS ACÚSTICO E ELÁSTICO 2D 41

4 **MÉTODO DE EMPILHAMENTO PONTO MÉDIO COMUM (CMP-2D)** 47

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO CMP NOS DADOS SINTÉTICOS 49

5 **MÉTODO DE EMPILHAMENTO SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM (CRS-2D)** 57

5.1 OPERADOR DE EMPILHAMENTO CRS-2D 59

5.2 ALGORITMO CRS-ZO 2D GLOBAL-LOCAL 61

5.2.1 **Etapa I: Otimização Global Pré-empilhamento** 62

5.2.2 **Etapa II: Otimização Global Pós-empilhamento** 62

5.2.3 **Etapa III: Otimização Local Pré-empilhamento** 63

5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO CRS NOS DADOS SINTÉTICOS 63

6 **ANÁLISE DOS RESULTADOS**..... 71

6.1 MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO DOS DADOS PROCESSADOS..... 77

7 **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**..... 84

REFERÊNCIAS..... 86

APÊNDICES..... 92

APÊNDICE A: *SCRIPTS* DE PROCESSAMENTO DO PACOTE SEISMIC UNIX..... 93

1 INTRODUÇÃO

Presentes em todas as bacias paleozóicas brasileiras, as soleiras de diabásio geradas pelo Evento Penatecaua no Jurotriássico durante a abertura do Atlântico Norte (ISSLER et al., 1974), exerceram um papel importante no processo de maturação da matéria orgânica, conforme os resultados das modelagens termomecânicas realizadas por Bender et al. (2001) a partir de dados geológicos e geofísicos da Bacia do Solimões. Por outro lado, essas soleiras de diabásio são uma problemática para a exploração geofísica por se tratarem de rochas que dificultam a penetração das ondas sísmicas.

A dificuldade em processar dados sísmicos de baixa qualidade proveniente de áreas com feições geológicas complexas associadas à ocorrência de rochas magmáticas, como as das bacias do Amazonas e do Solimões, surge do fato de que as soleiras de diabásio perturbam o sinal e causam efeitos que geralmente remetem à interpretações equivocadas quanto a existência de estruturas (EIRAS; WANDERLEY FILHO, 2002; GARABITO CALLAPINO et al., 2003; WANDERLEY FILHO; TRAVASSOS; ALVES, 2005).

Com o propósito de compreender a distribuição espacial das soleiras de diabásio que ocorrem nas bacias do Amazonas e do Solimões, bem como os efeitos que elas causam nas imagens sísmicas, muitos trabalhos vêm sendo realizados abordando estudos de modelagens sísmicas, aplicação de técnicas convencionais e não-convencionais de imageamento sísmico, dentre eles, Garabito Callapino et al. (2003); Lima, Garabito Callapino e Eiras (2003); Silva Neto et al. (2005); Nazaré et al. (2005), Lima (2006) entre outros.

Neste trabalho serão apresentados os resultados do estudo dos problemas do imageamento sísmico das bacias do Amazonas e do Solimões por meio da geração e processamento de dados sintéticos.

Para a geração dos dados sísmicos sintéticos será utilizada a técnica de diferenças finitas para a simulação de dados, tanto acústicos como elásticos, de ambas as bacias. Na simulação de dados acústicos, considera-se o meio como sendo fluido com a ocorrência de propagação somente das ondas P. Já na simulação de dados elásticos, o meio é considerado como sendo sólido com a ocorrência de propagação não somente da onda P como também da onda S.

Para o processamento dos dados acústicos e elásticos, gerados para ambas as bacias, foram aplicados os métodos CMP e CRS. O método de empilhamento ponto médio comum (CMP - *common midpoint*) é uma técnica que para simular seções afastamento nulo (ZO - *zero offset*) requer o conhecimento das velocidades de empilhamento, o qual constitui um macro-modelo de velocidade, designado para correções de sobretempo nos tempos de trânsito de reflexão sísmicas na configuração CMP (ŸILMAZ, 1987). O método de empilhamento superfície de reflexão comum (CRS - *common reflection surface*) é uma técnica mais recente que consiste na determinação, a partir dos dados sísmicos de cobertura múltipla, de três parâmetros CRS ótimos associados a cada ponto de amostragem da seção ZO a ser simulada, que são estimados por análise de coerência através de diferentes estratégias de busca automática e que não necessita a priori de um macro-modelo de velocidades (JÄGER et al., 2001; GARABITO CALLAPINO et al., 2001).

Neste trabalho serão apresentados os resultados do estudo dos problemas do imageamento sísmico das bacias do Amazonas e do Solimões por meio da geração e processamento de dados sintéticos. Serão apresentados os resultados das modelagens sísmicas, acústica e elástica, realizadas através da técnica de diferenças finitas. Serão apresentadas também as seções afastamento nulo (ZO) obtidas pelo processamento sísmico com as técnicas ponto médio comum (CMP) e superfície de reflexão comum (CRS), bem como as interpretações e as comparações feitas nessas seções afastamento nulo (ZO) após terem sido submetidas à migração em profundidade pós-empilhamento *split-step* (STOFFA et al., 1990). Finalmente serão apresentadas as discussões sobre os resultados e as principais conclusões obtidas neste trabalho.

2 GEOLOGIA DAS BACIAS DO AMAZONAS E DO SOLIMÕES E OS MODELOS SINTÉTICOS PROPOSTOS

2.1 GEOLOGIA DA BACIA DO AMAZONAS

A Bacia do Amazonas é uma bacia paleozóica do tipo intracratônica localizada na porção setentrional do Brasil e que abrange uma área de aproximadamente 500.000 km^2 dos estados do Amazonas e do Pará. Situada geologicamente entre as rochas pré-cambrianas das províncias Rio Branco e Tapajós, a bacia é limitada ao Norte pelo Escudo das Guianas, ao Sul pelo Escudo Brasileiro, à Leste pelo Arco de Gurupá (separando-a da Bacia do Marajó), e à Oeste pelo Arco do Purus (separando-a da Bacia do Solimões) (Figuras 2-1 e 2-2).

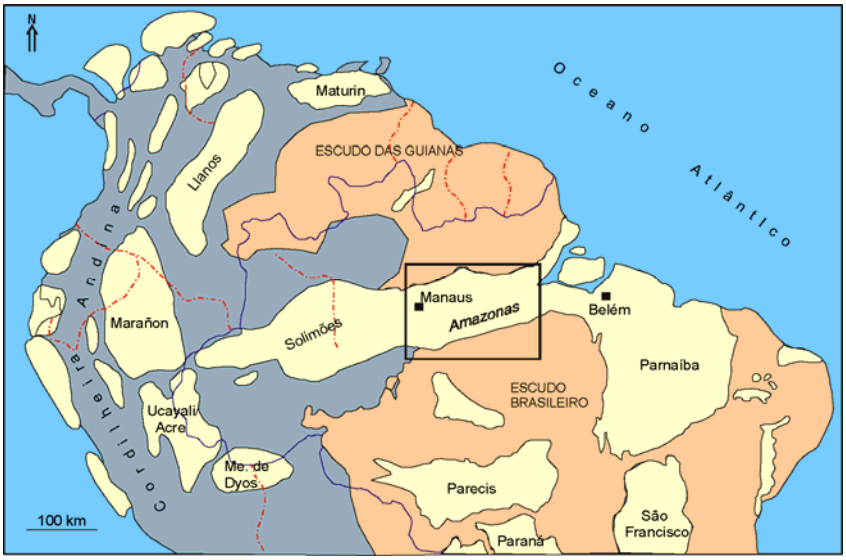


Figura 2-1: Mapa de localização da Bacia do Amazonas
Fonte: Modificado de (EIRAS; MATSUDA, 1995).

2.1.1 **Arcabouço Estrutural**

A origem da Bacia do Amazonas está relacionada a esforços do fim do Ciclo Brasiliano, no Proterozóico Superior. Nesta ocasião, o *rift*[1] que daria origem ao rio Amazonas resultaria da distensão norte-sul causada por esforços compressivos Leste-Oeste, responsáveis pela reativação da faixa de dobramento Araguaia-Tocantins (NEVES; RODRIGUES, 1989) (Figura 2-2).

[1] Segundo Duarte (1997), 1. Fissura crustal aberta e de longa extensão, resultante de esforços tensionais. 2. Vale alongado e estreito, formado pelo afundamento de um bloco crustal limitado, lateralmente, por falhas normais e paralelas.

De acordo com Cordani et al. (1984), o substrato proterozóico da bacia é constituído por rochas ígneas, metamórficas e vulcanossedimentares das províncias estruturais e geocronológicas Amazônia-Central e Maroni-Itacaiunas. Na região do Arco de Purus, ocorrem também rochas sedimentares proterozóicas do Grupo Purus, depositadas num sistema de bacias tipo *rift* englobadas principalmente nas Formações Prosperança e Acarí (EIRAS; MATSUDA, 1995) (Figura 2-4).

O arcabouço estrutural da bacia apresenta-se com duas extensas plataformas (uma ao norte e outra ao sul) e uma calha central segmentada nas direções Leste-Oeste e Sudoeste-Nordeste, separadas das plataformas por duas linhas de charneira, além dos arcos regionais limitantes da bacia (NEVES; RODRIGUES, 1989) (Figura 2-2).

Figura 2-2: Arcabouço estrutural da Bacia do Amazonas
Fonte: Modificado de (NEVES; RODRIGUES, 1989).

2.1.2 **Arcabouço Estratigráfico**

O arcabouço estratigráfico fanerozóico da bacia atinge cerca de 6.000 metros de espessura (Figura 2-3) e pode ser dividido em duas seqüências de primeira ordem: uma paleozóica cortada por diques e soleiras de diabásio, e outra mesozóico-cenozóica.

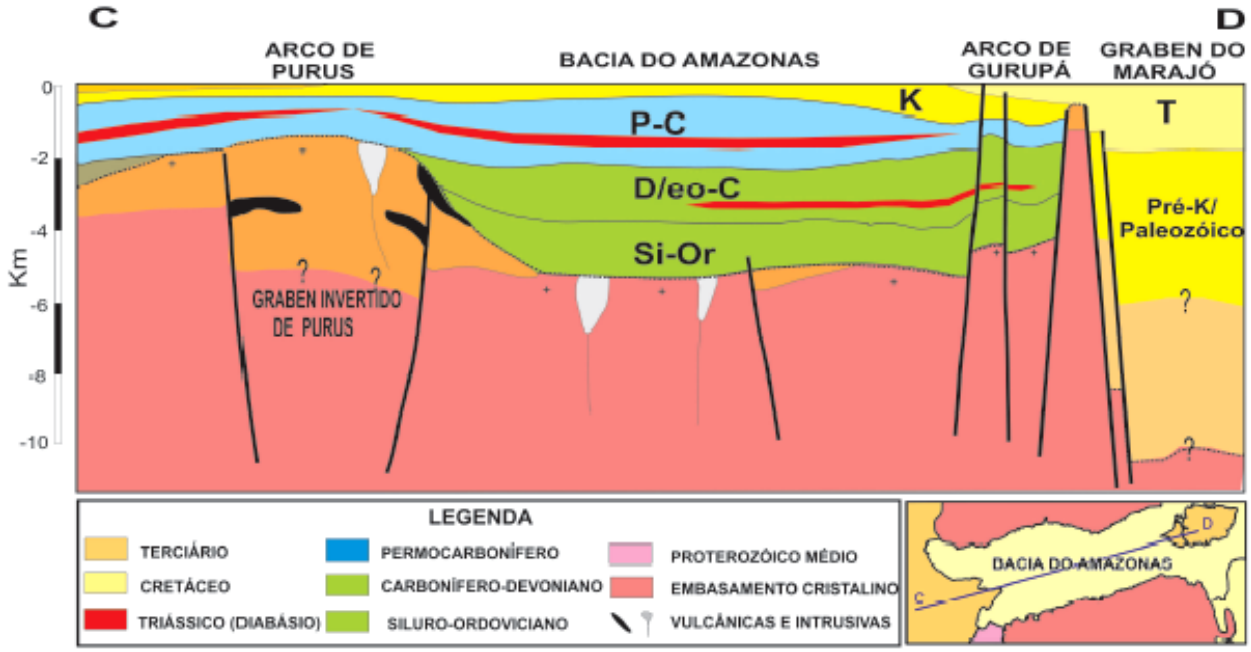


Figura 2-3: Seção geológica regional da Bacia do Amazonas
Fonte: Wanderley Filho, Travassos e Alves (2005).

Sob o ponto de vista da exploração petrolífera, a seqüência paleozóica é a mais importante, devido nela estarem contidas as rochas: geradora, reservatório e selante. De acordo com Eiras e Matsuda (1995), essa seqüência pode ser subdividida em três seqüências de segunda ordem, limitadas por discordâncias regionais (Figura 2-4):

(1) **Neo-ordoviciano - Eodevoniana**: que corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Trombetas;

(2) **Eodevoniano – Eocarbonífera**: representada pelos Grupos Urupadi e Curuá;

(3) **Neocarbonífero - Permiana**: que consiste no Grupo Tapajós.

Segundo Eiras e Matsuda (1995), a seqüência clástica neo-ordoviciano-eodevoniana foi depositada a partir da primeira invasão marinha paleozóica ocorrida na bacia, cujo ingresso proveio de Leste, consistindo essencialmente de clásticos fluviais, marinhos e glaciais e representados pelo Grupo Trombetas. A sedimentação da seqüência eodevoniano-eocarbonífera ocorreu durante o segundo evento de subsidência e ingressão marinha na bacia, igualmente proveniente de Leste, e representada pelos Grupos Urupadi e Curuá (Figura 2-4).

Uma nova subsidência acompanhada de uma significativa mudança climática, de frio para quente e árido, condicionou a deposição da seqüência químico-evaporítica neocarbonífero-

permiana. Nessa ocasião, a invasão marinha proveniente de Oeste, submergiu campos de dunas eólicas da Bacia do Solimões, recobriu o Arco de Purus, havendo interligação das bacias do Solimões e do Amazonas. A deposição evoluiu de clásticos fluviais, eólicos e marinho-rasos no início, para carbonatos e depósitos marinho-normais a lacustre hipersalinos e, posteriormente, clásticos fluvio-lacustres e mais raramente evaporitos da fase regressiva. Essa seqüência é representada pelo Grupo Tapajós (DAMASCENO, 2000) (Figura 2-4).

No Jurotriássico, a bacia foi palco de eventos magmáticos relacionados à abertura do Atlântico e os possíveis efeitos da orogenia e subducção de alto ângulo ocorridas na zona andina, registrados através dos diques e soleiras de diabásio que cortam a seção pré-cretácea (EIRAS; MATSUDA, 1995).

Após um longo período de exposição e intensa erosão das rochas paleozóicas, auxiliado também pelos soerguimentos causados pelas intrusões de soleiras de diabásio, iniciou-se a deposição da seqüência de primeira ordem mesozóico-cenozóica representada pelo Grupo Javari (EIRAS; MATSUDA, 1995).

De acordo com Eiras e Matsuda (1995), a Bacia do Amazonas foi submetida a um evento transformador transcorrente transtensivo, na borda Leste e transpressivo na borda Oeste, apesar de não ter sofrido grandes interferências da tectônica Juruá, de idade provavelmente juro-cretácea.

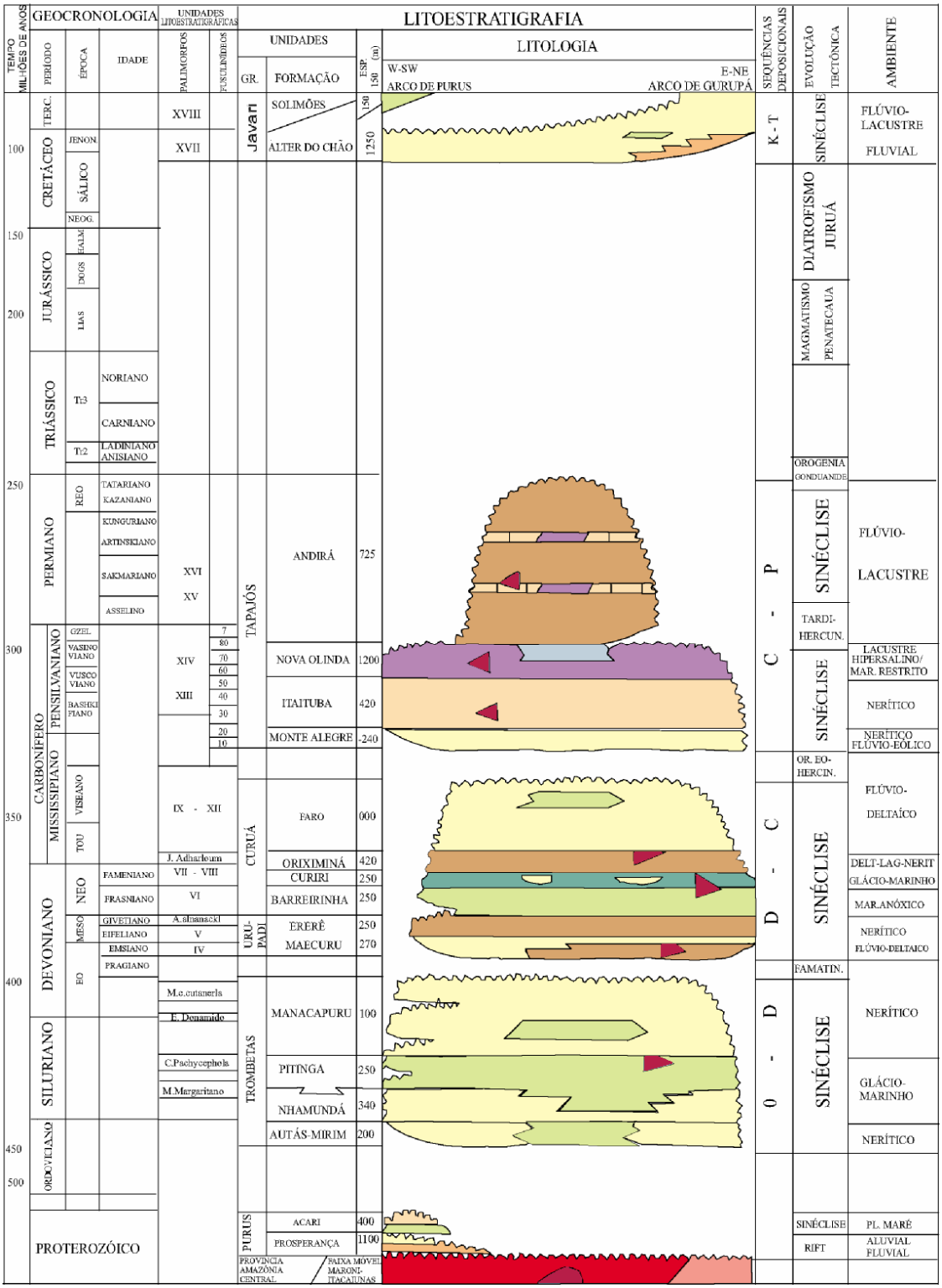


Figura 2-4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas
Fonte: Cunha et al. (1994) modificado por (EIRAS; MATSUDA, 1995).

2.2 GEOLOGIA DA BACIA DO SOLIMÕES

A Bacia do Solimões está localizada na Região Norte do Brasil estando limitada ao Norte pelo Escudo das Guianas, ao Sul pelo Escudo Brasileiro, a Leste pelo Arco de Purus e a Oeste pelo Arco de Iquitos (Figura 2-5). Ocupa aproximadamente 480.000 km^2 do Estado do Amazonas apresentando um formato semelhante a um elipsóide cuja direção do eixo principal é Nordeste-Sudoeste.

De acordo com Eiras (1998), a Bacia do Solimões teve, assim como as demais bacias paleozóicas brasileiras, uma evolução tectono-sedimentar comum, onde as seqüências paleozóicas evidenciam registro de várias incursões marinhas, embora com preenchimento sedimentar essencialmente siliciclástico (com exceção da seqüência permocarbonífera); as seqüências mesozóicas, por serem escassas, evidenciam um período de intensos soerguimentos, erosões e magmatismo; e as cenozóicas, essencialmente continentais, evidenciam o término do período evolutivo da bacia.

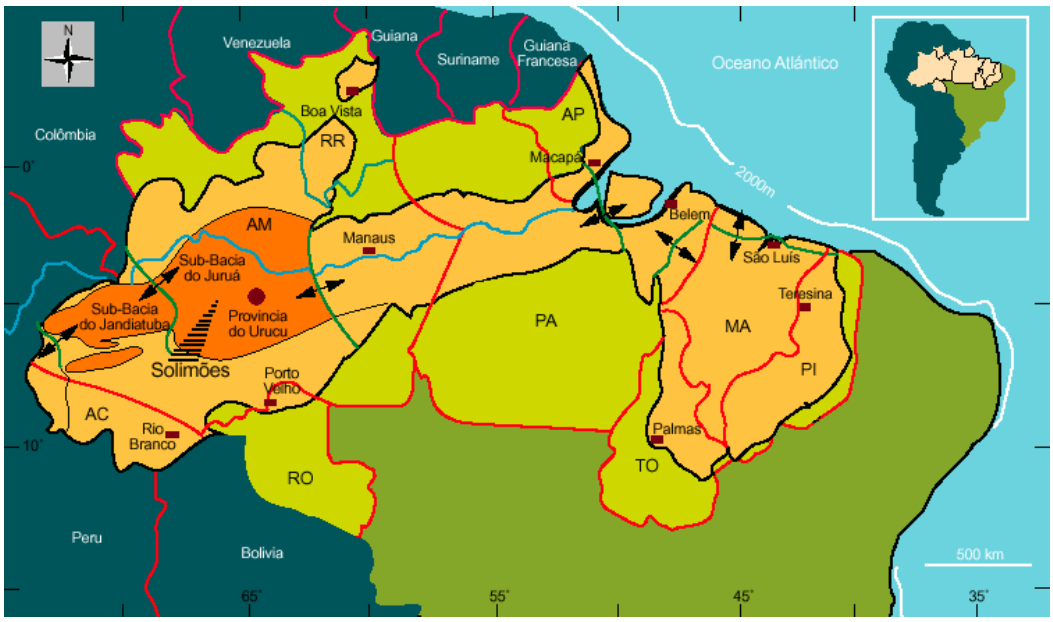


Figura 2-5: Mapa de localização da Bacia do Solimões
Fonte: (EIRAS, 1998).

2.2.1 **Arcabouço Estrutural**

A Bacia do Solimões é preenchida por aproximadamente 4.000 metros de rochas fanerozóicas e está localizada sobre um substrato proterozóico constituído por rochas ígneas e metamórficas, tanto na Sub-bacia do Jandiatuba quanto na Sub-bacia do Juruá, embora nessa última, além dessas rochas, ocorram também rochas sedimentares que foram depositadas sobre um amplo sistema de *rifts* proterozóicos.

Segundo Eiras (1998), os eventos tectônicos intraplaca que ocorreram no Fanerozóico produziram movimentos epirogenéticos, devido às interações ocorridas na borda da placa litosférica gonduânica, atual placa sul-americana. Tais movimentos reativaram os arcos regionais, controlaram as invasões marinhas, os processos sedimentares e erosivos, bem como o magmatismo mesozóico. Foram responsáveis também pela formação de dobras e falhas, sendo no Mesozóico através da tectônica denominada Juruá, evento esse essencialmente transpressivo, o mais importante e intenso, responsável pela reativação de estruturas mais antigas, pela geração de falhas reversas e pela formação das dobras anticlinais que hoje compõem as trapas de óleo, de gás e de condensado (Figura 2-6).

A Bacia do Solimões é dividida pelo Arco de Carauari em duas sub-bacias denominadas Sub-bacia do Jandiatuba e Sub-bacia do Juruá (Figuras 2-6, 2-7 e 2-8).

O Arco de Carauari é uma ampla feição estrutural positiva intrabacinal, de orientação geral Nordeste-Sudeste, que exerceu forte controle na sedimentação no Ordoviciano, no Devoniano e no Permocarbonífero, sendo neste último com menor intensidade (Figuras 2-6, 2-7 e 2-8).

A Sub-bacia do Jandiatuba está situada na porção ocidental da Bacia do Solimões (Figuras 2-6, 2-7 e 2-8). Quanto à potencialidade petrolífera, de acordo com Eiras (1998), esta sub-bacia dispõe de poucas informações quanto questões geológicas e ambientais devido estar situada em extensas áreas indígenas e florestais, que impedem a execução de projetos exploratórios por se tratarem de áreas protegidas. Mas, com base em resultados de poucos prospectos testados na década de 80, sabe-se que as rochas existentes nessa sub-bacia com potencial para reservatório possuem alto risco exploratório por estarem muito cimentadas por sílica, embora com características geoquímicas semelhantes às encontradas na Sub-bacia do Juruá.

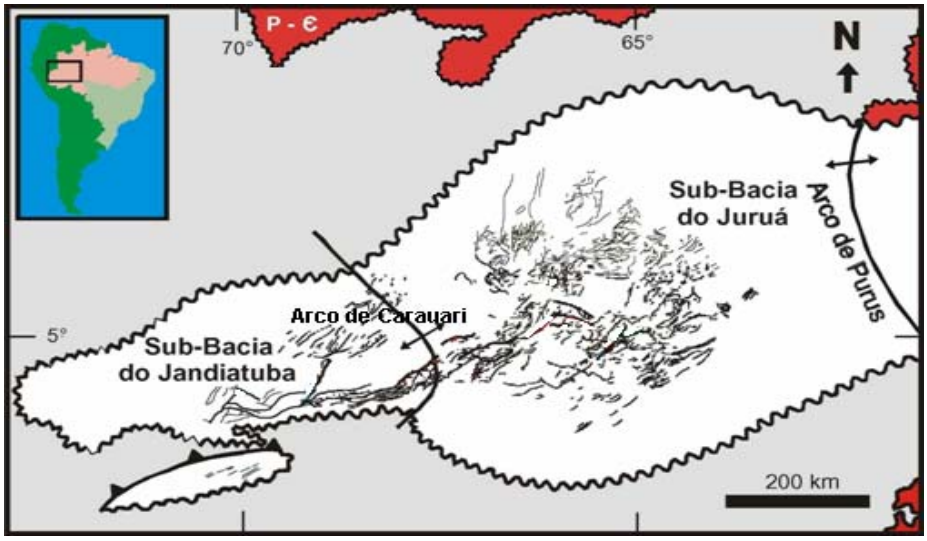


Figura 2-6: Mapa de localização e estrutural da Bacia do Solimões
Fonte: Bender et al. (2001) modificado por (LIMA; GARABITO CALLAPINO; EIRAS, 2003).

A Sub-bacia do Juruá está situada na porção oriental da Bacia do Solimões (Figuras 2-6, 2-7 e 2-8). Nessa sub-bacia estão os principais campos de óleo e gás da Amazônia Brasileira, sendo atualmente os mais explorados devido às descobertas de petróleo, motivadas pelo fato de não haver severas restrições ambientais e sociais para a realização de pesquisas. De acordo com Eiras (1998), a seqüência carbonífera dessa sub-bacia contém excelentes reservatórios, enquanto que a devoniana contém ótimas rochas geradoras; na seqüência permocarbonífera são encontradas as mais expressivas intrusões de diabásio da Bacia do Solimões, tanto em número quanto em espessura de corpos. As trapas responsáveis pelas acumulações de petróleo foram formadas no Mesozóico pela denominada Tectônica Juruá, relacionada à abertura do Atlântico Norte.

A espessura acumulada de diabásio, que se encontra preservada nas porções mais profundas da Sub-bacia do Juruá, é superior a 1.000 metros (Figura 2-7), conforme Eiras (1998). O efeito térmico dessa enorme quantidade de rocha magmática sobre a matéria orgânica foi responsável pela geração e craqueamento do óleo e gás num período de tempo geológico curto.

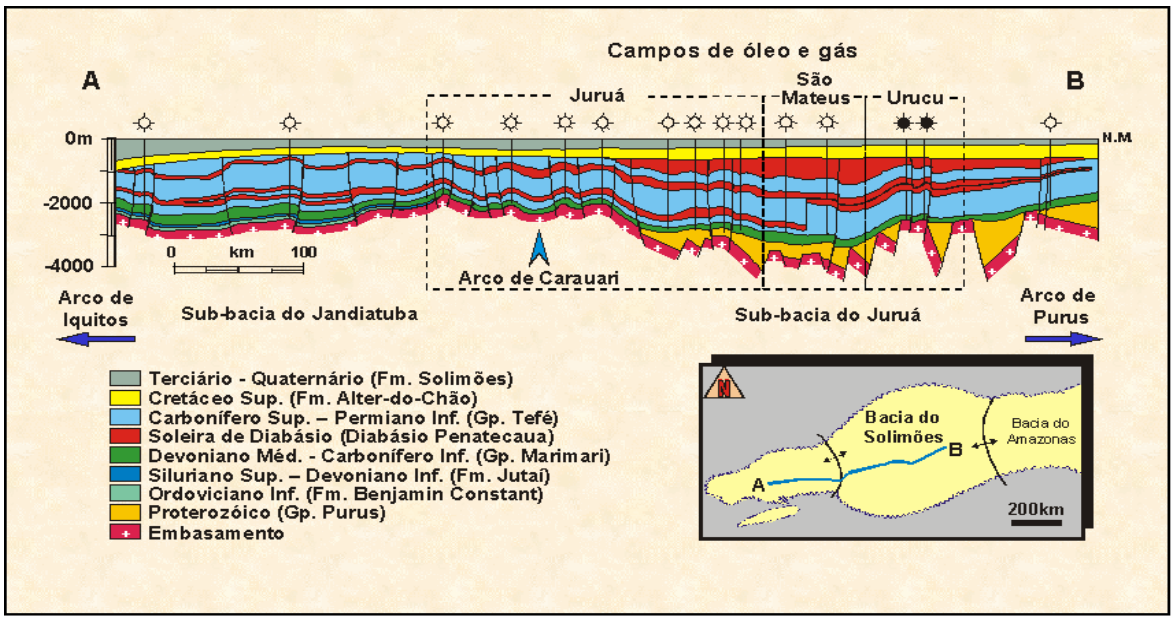


Figura 2-7: Seção geológica regional da Bacia do Solimões
Fonte: (EIRAS, 1998).

2.2.2 **Arcabouço Estratigráfico**

De acordo com Eiras et al. (1994), o arcabouço estratigráfico pode ser dividido em duas seqüências de primeira ordem: uma paleozóica cortada por diques e soleiras de diabásio, e outra mesozóica-cenozóica (Figuras 2-7 e 2-8).

A megasseqüência paleozóica é a mais importante, pois contém as rochas geradora, reservatório e selante, bem como as feições estruturais que compõem as trapas responsáveis pelas acumulações de óleo, gás e condensado descobertas na bacia (EIRAS, 1998) (Figura 2-8), podendo ser divida em quatro seqüências de segunda ordem:

(1) **Eo-ordoviciana**: composta por rochas clásticas neríticas da Formação Benjamin Constant que encontram-se truncadas por discordância devido ao soerguimento provavelmente relacionado à Orogenia Taconiana, estando restrita à Sub-bacia do Jandiatuba (Figura 2-8);

(2) **Neo-siluriano – Eodevoniana**: composta por rochas clásticas e carbonáticas neríticas da Formação Jutaí, sendo restrita à Sub-bacia do Jandiatuba (Figura 2-8);

(3) **Mesodevoniano – Eocarbonífera**: composta por rochas clásticas e depósitos silicosos neríticos e glácio-marinhos do Grupo Marimari, que ultrapassaram o Arco de Carauari, fazendo parte tanto da Sub-bacia do Jandiatuba quanto da Sub-bacia do Juruá (Figura 2-8). O

soerguimento ligado à Orogenia Eo-herciniana foi responsável pela discordância que separa essa seqüência da seqüência descrita a seguir;

(4) **Neocarbonífero – Eopermiana**: composta por rochas clásticas, carbonáticas e evaporíticas marinhas e continentais, correspondentes ao Grupo Tefé, presentes em toda a Bacia do Solimões (Figura 2-8). A discordância erosiva instalada sobre essa seqüência está associada à Orogenia Tardi-herciniana e ao Diastrofismo Juruá;

Os diques e soleiras de diabásio, intrudidos nas seqüências paleozóicas, foram gerados pelo Evento Penatecaua (Figura 2-8). Esse evento ocorreu durante a abertura do Atlântico Norte no Jurotriássico, sendo responsável pelas inúmeras intrusões de material magmático. Esse processo foi crucial na maturação da matéria orgânica na rocha geradora devoniana e no tipo de petróleo acumulado na rocha-reservatório carbonífera. Os três grupos de soleiras, cujas espessuras são superiores a 150 metros cada, intrudiram em camadas argilosas, acompanhando grosseiramente os planos de estratificação (EIRAS, 1999) (Figura 2-7).

A seqüência de primeira ordem mesozóica-cenozóica, correspondente ao Grupo Javari, foi controlada pela deflexão estrutural da placa sul-americana causada pela sobrecarga andina, essa seqüência é dividida em duas seqüências de segunda ordem (Figura 2-8):

(1) **Neocretácea**: composta por rochas clásticas da Formação Alter-do-Chão depositadas por um sistema fluvial que se instalou como conseqüência da tectônica Andina;

(2) **Terciário – Quaternária**: compostas por pelitos e arenitos flúvio-lacustres da Formação Solimões, também relacionados à atividade Andina (Figura 2-8).

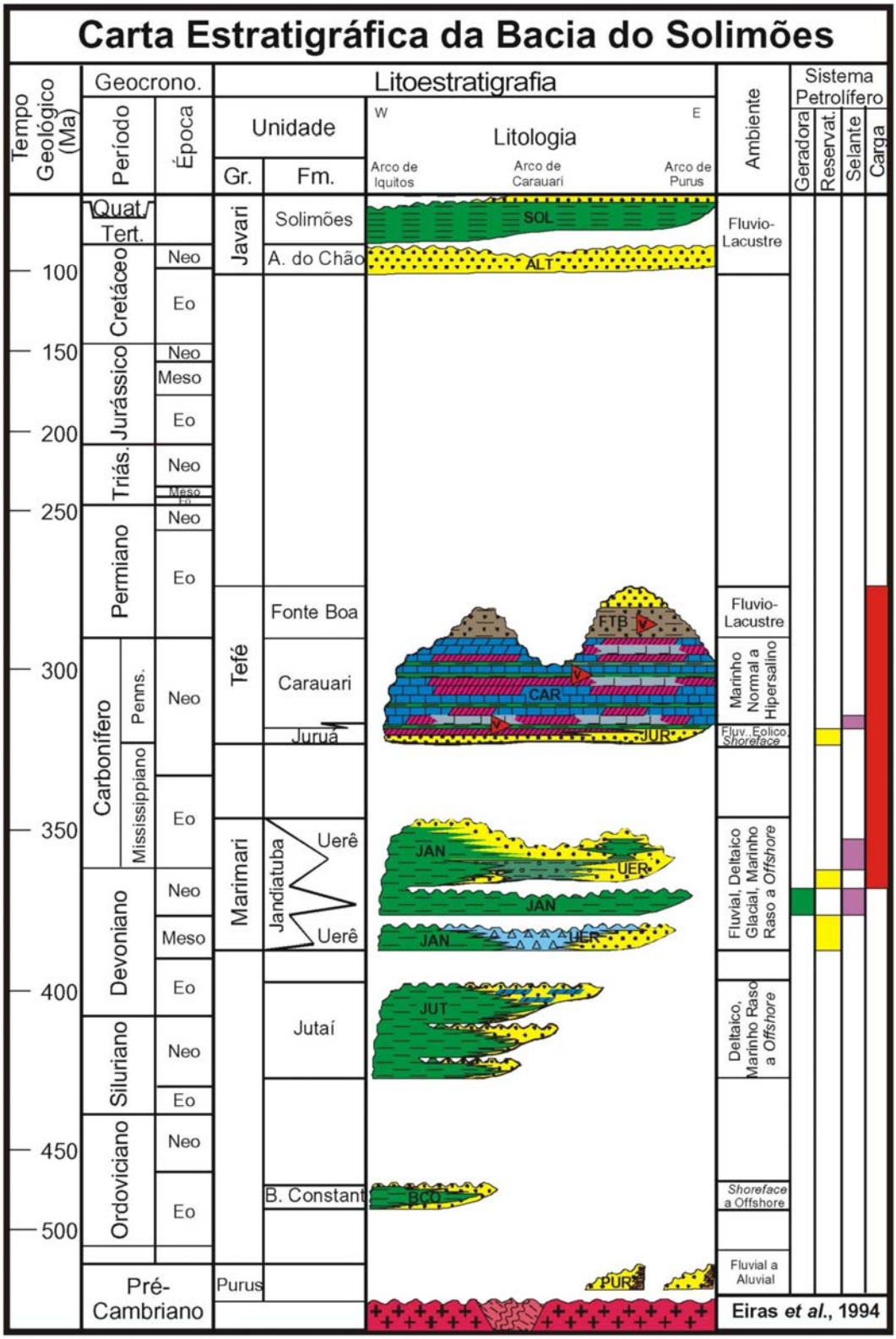


Figura 2-8: Carta estratigráfica da Bacia do Solimões
Fonte: Eiras et al. (1994) modificado por (BENDER, et al., 2001).

2.3 PROBLEMAS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS

Os eventos tectono-termais, caracterizados pelos pulsos magmáticos que atingiram praticamente todas as bacias paleozóicas brasileiras, foram os responsáveis pela injeção de milhões de quilômetros cúbicos de material magmático no interior destas bacias.

Apesar dessas soleiras de diabásio que se encontram intrudidas nas rochas paleozóicas das bacias do Amazonas e Solimões terem atuado como fonte extra de calor para o processo de transformação da matéria orgânica em óleo e gás, sob o ponto de vista exploratório, a ocorrência de rochas magmáticas nas porções internas de bacias sedimentares pode deteriorar a qualidade das seções sísmicas, por causarem a perda do sinal, a geração de múltiplas e o espalhamento do sinal, prejudicando assim, a interpretação dos dados pela formação de falsas estruturas ocasionadas pelos efeitos *pull-up*[2] ou *pull-down*[3] (EIRAS; WANDERLEY FILHO, 2002).

Com a intenção de melhor entender e suprimir esses efeitos negativos na qualidade das imagens sísmicas das bacias do Amazonas e do Solimões, vários trabalhos vem sendo desenvolvidos utilizando modelagens sísmicas 2D e 3-D por métodos numéricos (LIMA, 2006; LIMA; GARABITO CALLAPINO; EIRAS, 2003; SILVA NETO, 2004; SILVA NETO et al., 2005; entre outros), assim como a aplicação de técnicas de processamento sísmico convencional e não-convencional (GARABITO CALLAPINO et al., 2003; NAZARÉ et al., 2005; PASCHOAL JR., 2004; entre outros).

Foram cedidos pela UN-BSOL/PETROBRAS ao Projeto “Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios” (MODELAGEM, 2003) modelos geológicos da Bacia do Amazonas obtidos através de interpretações realizadas em seções sísmicas com o auxílio de perfilagem de poço. Nesses modelos foram definidas 19 interfaces estruturais e 20 camadas de material rochoso, dentre elas um espesso pacote de evaporitos intercalados por folhelhos, além de 3 soleiras de diabásio e o embasamento. A complexidade da situação mostrada nesses modelos deve-se a ocorrência de espessamento da primeira soleira, complexidade essa que serviu de motivação para a geração de um modelo representativo da Bacia do Amazonas (Figura 2-9).

---

[2] Segundo Duarte (1997), pseudo-elevação e/ou pseudo-alto. Nos levantamentos de reflexão sísmica, redução localizada do tempo de reflexão ocasionada por uma camada de alta velocidade sobrejacente.

[3] Segundo Duarte (1997), pseudo-depressão. Em reflexão sísmica, aumento localizado do tempo de reflexão ocasionado pela presença de um corpo sobrejacente de baixa velocidade.

Alves et al. (2000) efetuaram um estudo empregando o espectrômetro de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (*inductively coupled plasma mass spectrometer* – ICP-MS) para determinar a distribuição vertical de elementos traços das soleiras de dois poços da Bacia do Solimões. Com base na distribuição dos elementos cromo e níquel, esses autores concluíram que a soleira inferior saltou de nível e a superior bifurcou entre os poços analisados. Lima, Garabito Callapino e Eiras (2003) realizaram uma modelagem sísmica acústica 2D por diferenças finitas a partir de uma seção sísmica migrada no tempo e interpretada com o auxílio de dados geológicos e geofísicos de poço (perfis sônicos e de raios gama) provenientes da Bacia do Solimões, onde simularam 8 camadas de rochas sedimentares, 3 soleiras de diabásio e o embasamento, além disso foram simuladas também duas falhas reversas com grande desnível entre os blocos alto e baixo. Com base nas complexidades mostradas nesses trabalhos, Nazaré et al. (2005) geraram um modelo representativo da Bacia do Solimões contendo saltos e bifurcações de soleiras (Figura 2-10).

Com o propósito de entender a propagação das ondas sísmicas e principalmente as dificuldades dos métodos de imageamento sísmico em ambientes geológicos complexos, neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos nas modelagens acústica e elástica, bem como do processamento sísmico convencional e não convencional dos dados sintéticos gerados retratando as complexidades descritas anteriormente das bacias do Amazonas e do Solimões.

A seguir serão mostradas as descrições dos modelos propostos representativos das bacias do Amazonas e do Solimões utilizados nas modelagens acústicas e elásticas.

2.4 MODELOS SINTÉTICOS PROPOSTOS

2.4.1 **Modelo Geológico I - Bacia do Amazonas**

Com base nos problemas geofísicos e geológicos descritos anteriormente e através das ferramentas *Bézier* e a paleta de cores RBG do programa CorelDRAW 11, foi gerada uma seção geológica de 20.000 metros de extensão (horizontal) e de 4.000 metros de profundidade (vertical) composta por 19 camadas de rochas, dentre elas 3 soleiras de diabásio e o embasamento, as quais compõem os 4.000 metros de espessura de rocha considerados neste trabalho. Em geral, modelo

possui geometria suave, apresentando somente um espessamento na porção central da primeira soleira (S1). A ordem adotada para a denominação das camadas é da mais recente para a mais antiga. As características quanto às espessuras das camadas foram definidas com base no modelo geológico disponibilizado ao Projeto “Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios” (MODELAGEM, 2003), conforme mostrado na Tabela 2-1. Logo, a partir dessas informações desenvolveu-se uma seção geológica (Figura 2-9) no domínio da profundidade, como suporte aos modelos de velocidade das ondas P e S e de densidade 2D necessários para a geração dos dados sísmicos sintéticos acústicos e elásticos 2D.

2.4.2 **Modelo Geológico II - Bacia do Solimões**

Com base nos problemas geofísicos e geológicos descritos anteriormente e através das ferramentas *Bézier* e a paleta de cores RBG do programa CorelDRAW 10 (NAZARÉ et al., 2005), foi gerada uma seção geológica de 20.000 metros de extensão (horizontal) e de 4.000 metros de profundidade (vertical) composta por 22 camadas representativas de rochas, dentre elas 4 soleiras de diabásio e o embasamento. Essas camadas foram reunidas em 2 grandes agrupamentos: um inferior, com cerca de 2.500 metros que estão dobradas, falhadas (rejeito de 50 metros) e intrudidas por soleiras de diabásio; e uma superior, com cerca de 500 metros de camadas de rochas, não deformadas (Figura 2-10). A ordem adotada para a denominação das camadas é da mais recente para a mais antiga. As características quanto às espessuras e velocidades, mostradas na Tabela 2-2, foram baseadas em Eiras et al. (1994). Logo, a partir dessas informações foi possível propor uma seção geológica (Figura 2-10) no domínio da profundidade, como suporte ao modelo geofísico 2D utilizado para gerar dados sísmicos sintéticos 2D através da técnica de modelagem sísmica elástica 2D por diferenças finitas.

Tabela 2-1: Parâmetros utilizados para a geração da seção geológica representativa da Bacia do Amazonas para a modelagem, com base em modelos geológicos gerados interpretados a partir de dados reais da Bacia do Amazonas cedidos ao Projeto “Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios”

UNIDADE	LITOLOGIA		ESPESSURA (m)
I	Arenito		290
II	Siltito		148
III	Siltito		75
IV	Evaporitos		1230
V	Arenito		32
VI	Folhelho		390
VII	Calcário		236
VIII	Folhelho		168
IX	Folhelho		518
S	Diabásio	S1	264/411
		S2	107
		S3	78

Fonte: (MODELAGEM, 2003).

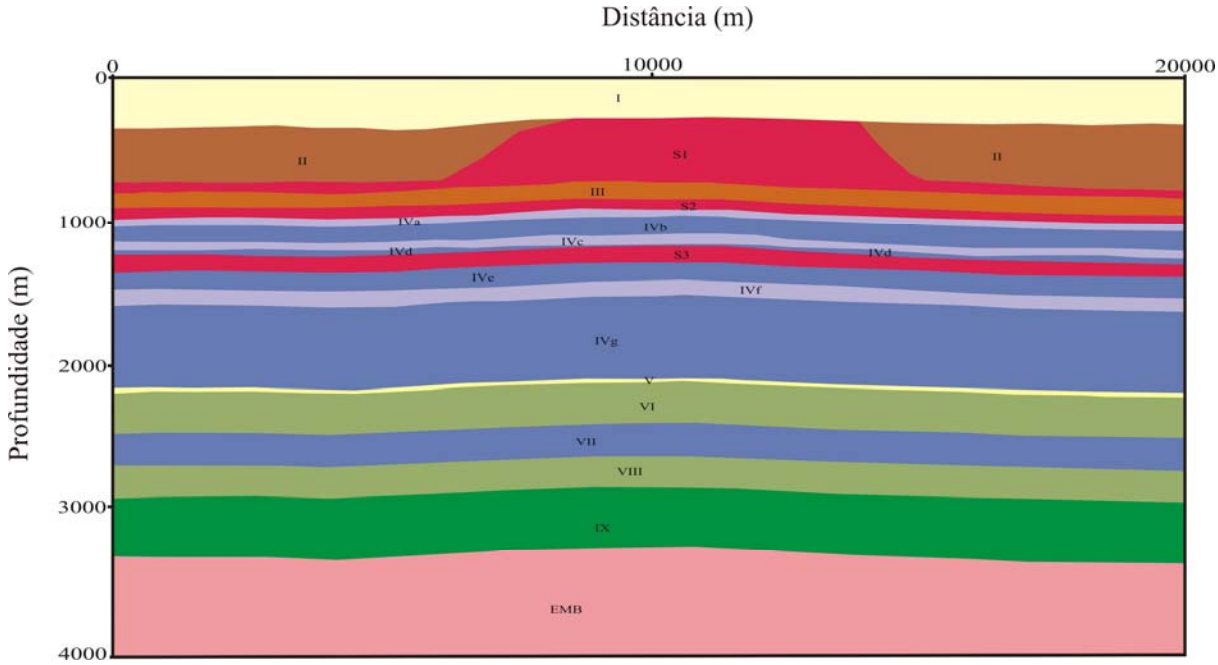


Figura 2-9: Modelo geológico proposto com base em modelos geológicos gerados interpretados a partir de dados reais da Bacia do Amazonas cedidos ao Projeto “Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em alvos exploratórios”

Fonte: (MODELAGEM, 2003).

Tabela 2-2: Parâmetros utilizados para a geração da seção geológica representativa da Bacia do Solimões.

UNIDADE	LITOLOGIA	ESPESSURA (m)
I	Argilito	160
II	Arenito	300
III	Siltito	3750
IV	Evaporitos	1300
V	Arenito	210
VI	Folhelho	60
S	Diabásio	150

Fonte: De acordo com Eiras et al. (1994).

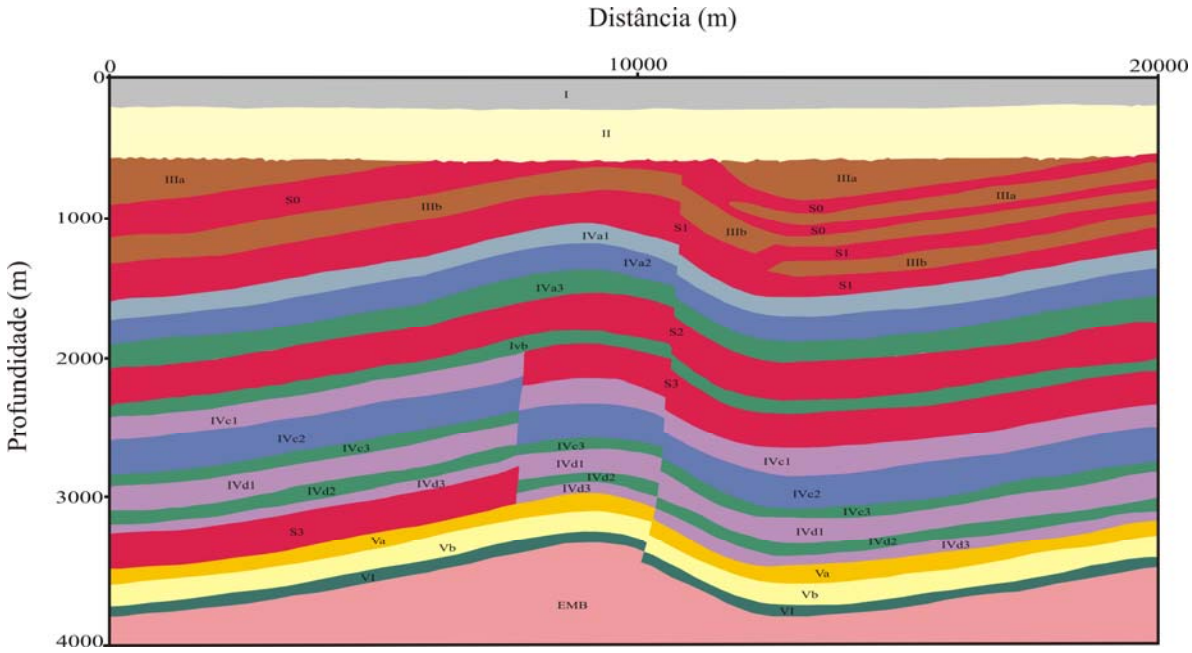


Figura 2-10: Modelo geológico proposto a partir das complexidades apresentadas em estudos anteriores realizados na Bacia do Solimões
Fonte: (modificado de NAZARÉ et al., 2005).

2.4.3 **Modelos de Velocidades e de Densidades**

Para construção e visualização dos modelos I e II de velocidades das ondas P e S e de densidades foram utilizados, respectivamente, os programas Seis88 e MatLab 6.0, ambos com licença para o Laboratório de Processamento de Dados Sísmicos - ProSis. Os modelos de densidade e de velocidade das ondas P e S gerados (I e II) foram construídos com malha regular de dimensões 4001 células na horizontal por 801 células na vertical, tendo um intervalo constante de 5 metros em ambas as dimensões (Figuras 2-11 e 2-12).

A geometria dos modelos (espessuras de camadas e as feições estruturais) e as velocidades da onda P foram obtidas em Eiras et al. (1994); Lima, Garabito Callapino e Eiras (2003) e Modelagem (2003); Para os diferentes litotipos existentes nos modelos, as informações referentes às densidades foram atribuídas com base em Log (1986), levando em consideração a densidade do mineral de maior abundância em um determinado litotipo. Através da fórmula para meio de *Poisson* que permite determinar a velocidade da onda S a partir da velocidade da onda P, foi possível estimar as diferentes velocidades para ambos os modelos:

$$V_s = \frac{V_p}{\sqrt{3}},$$

sendo, V_s a velocidade da onda S e V_p a velocidade da onda P.

Com o objetivo de simular modelos com características semelhantes à realidade das bacias utilizadas neste trabalho, as densidades bem como as velocidades das ondas P e S utilizadas foram comparadas aos dados reais utilizados em Sobreira et al. (2004) para a realização de um estudo de viabilidade técnica e planejamento para a aquisição sísmica multicomponente através de uma modelagem sísmica elástica, o qual utilizou como exemplo a Bacia do Solimões. Essa comparação mostrou que os valores que foram estimados aqui para a densidade e para a velocidade da onda S possuem valores aproximados aos dados reais, aumentando dessa forma a similaridade entre os dados sintéticos aos dados reais existentes das bacias em estudo.

Em ambos os modelos, as velocidades intervalares médias foram consideradas invariáveis tanto na horizontal quanto na vertical, exceto as duas primeiras camadas de ambos os modelos onde foram simulados através do programa MatLab 6.0, laminações com o objetivo de gerar efeitos de dispersão (redução das amplitudes das reflexões) semelhantes aos que ocorrem em registros realizados no interior da Terra. As densidades e as velocidades das ondas P e S

utilizadas para os litotipos simulados nos modelos I e II estão definidos nas Tabelas 2-3 e 2-4, respectivamente.

Tabela 2-3: Valores de densidade e velocidades das ondas P e S utilizadas para a geração do modelo geofísico I - Bacia do Amazonas.

UNIDADE	LITOLOGIA			VELOCIDADE P (m/s)	VELOCIDADE S (m/s)	DENSIDADE (g/cm³)
I	Arenito			2000	1000	2,20
II	Siltito			2800	1617	2,67
III	Siltito			4200	2425	2,80
IV	SEQÜÊNCIA EVAPORÍTICA	Halita	a	4500	2598	2,04
		Calcário	b	5800	3349	2,71
		Halita	c	4500	2598	2,04
		Calcário	d	5800	3349	2,71
		Calcário	e	4700	2714	
		Halita	f	4500	2598	2,04
		Calcário	g	5000	2887	2,71
V	Arenito			4500	2598	2,64
VI	Folhelho			4350	2511	2,68
VII	Calcário			3600	2078	2,71
VIII	Folhelho			4300	2483	2,68
IX	Folhelho			4600	2650	2,70
EMB				5300	2660	2,60
S	Diabásio		S1	5000	2887	2,56
			S2	5500	3175	
			S3	6200	3580	2,75

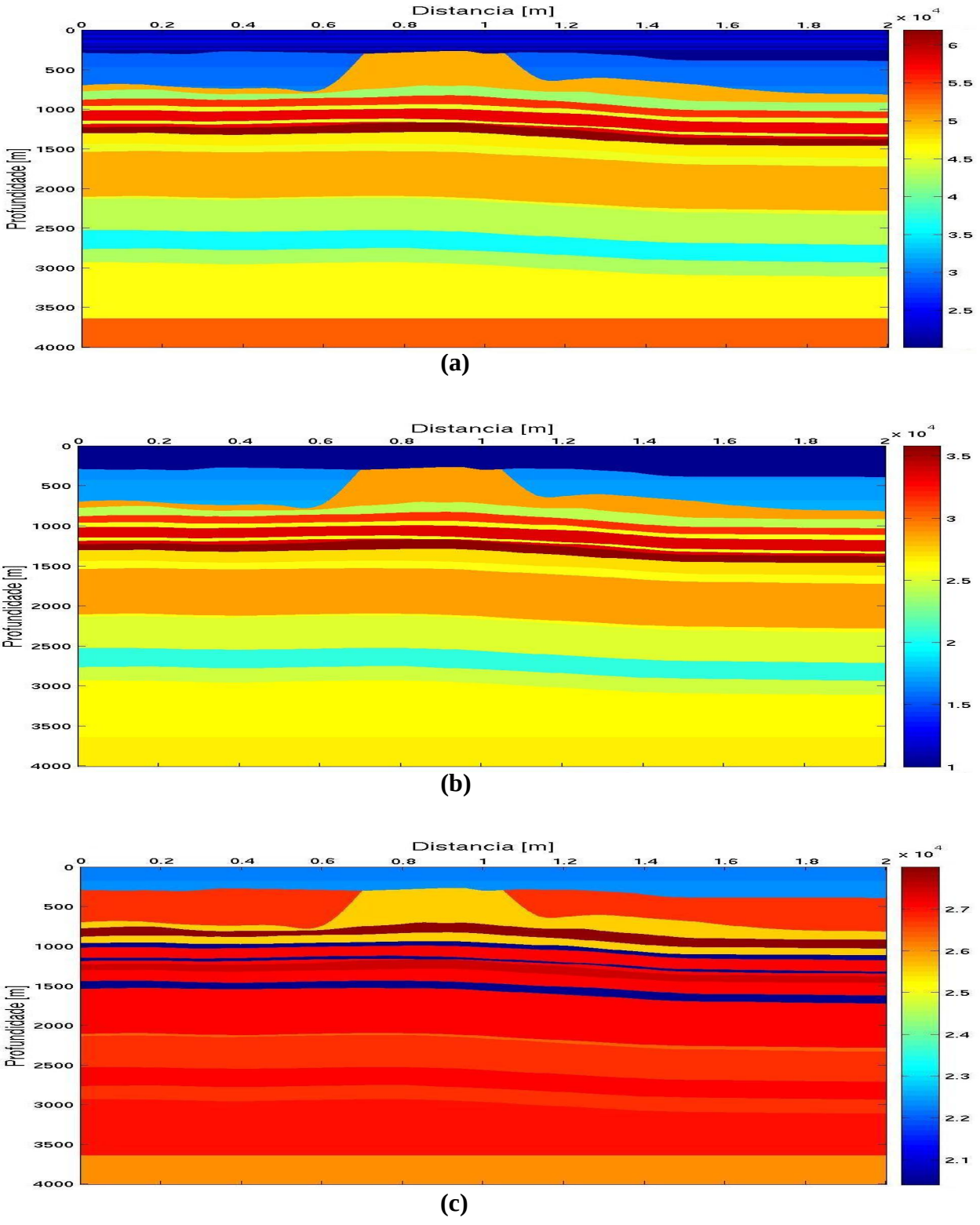


Figura 2-11: Modelos geofísicos gerados a partir do modelo geológico I - Bacia do Amazonas: (a) modelo de velocidade das ondas P; (b) modelo de velocidade das ondas S e (c) modelo de densidade.

Tabela 2-4: Valores de densidade e velocidades das ondas P e S utilizadas para a geração do modelo geofísico II - Bacia do Solimões.

UNIDADE	LITOLOGIA			VELOCIDADE P (m/s)	VELOCIDADE S (m/s)	DENSIDADE
I	Argilito			1750	720	2,10
II	Arenito			2300	1150	2,20
III	Siltito		a	3750	2165	2,67
			b	3850	2223	
IV	SEQÜÊNCIA EVAPORÍTICA	Halita	a1	4000	2309	2,04
		Calcário	a2	5300	3060	2,71
		Folhelho	a3	5500	3175	2,68
		Folhelho	b	5450	3147	
		Anidrita	c1	5600	3233	2,98
		Calcário	c2	5400	3118	2,71
		Folhelho	c3	5200	3002	2,68
		Anidrita	d1	5600	3233	2,98
		Folhelho	d2	5400	3118	2,68
		Anidrita	d3	5200	3002	2,98
V	Arenito		a	4850	2800	2,64
			b	4650	2685	2,55
VI	Folhelho			5100	2944	2,68
EMB				5250	3031	2,60
S	Diabásio		S0	5900	3406	2,75
			S1	6150	3551	2,96
			S2			
			S3			

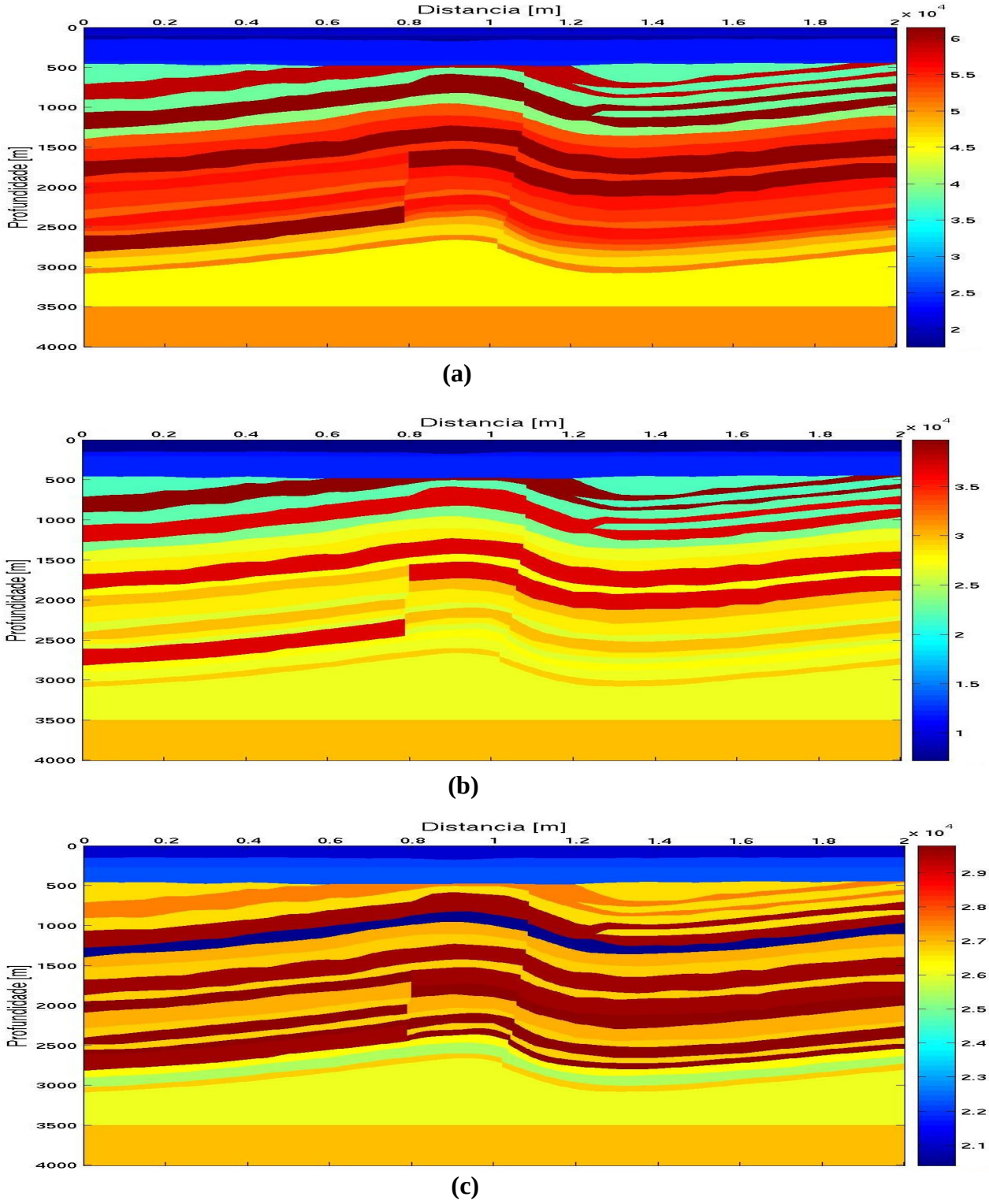


Figura 2-12: Modelos geofísicos gerados a partir do modelo geológico II - Bacia do Solimões: (a) modelo de velocidade das ondas P; (b) modelo de velocidade das ondas S e (c) modelo de densidades.

3 DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS

De acordo com Duarte (1997), o termo modelagem consiste no ato de simular os efeitos a partir de um modelo físico ou matemático (modelagem direta) ou inferir o modelo físico correspondente aos efeitos observados (modelagem inversa).

Na sísmica, segundo Duarte (1997), a modelagem consiste num processo matemático, geralmente realizado com auxílio de computadores, por meio do qual se procura sintetizar a seção de reflexão sísmica correspondente a um modelo geológico (modelagem direta) ou o modelo geológico correspondente aos dados sísmicos (modelagem inversa).

Em termos práticos, Carcione, Herman e Kroode (2002) e Chopra (2005) afirmam que a modelagem sísmica pode auxiliar na escolha do tipo de aquisição e dos parâmetros de processamento dos dados, assim como no auxílio de decisões de interpretação quando simulada a partir de modelos geológicos com características semelhantes à realidade em subsuperfície.

De acordo com Carcione, Herman e Kroode (2002), a modelagem sísmica pode ser classificada em métodos diretos, da equação integral e do traçamento do raio. Sendo que neste trabalho são aplicados os métodos diretos. Para resolver a equação da onda através de métodos diretos, o modelo geológico é aproximado por malha numérica, ou seja, o modelo é limitado em um número finito de pontos. Essa técnica também é conhecida como método de malha e como método da equação da onda completa, visto que a solução resulta em um campo de onda completo; além disso, pode lidar com diferentes reologias[1], e é bem adaptada para a geração de *snapshots*[2], os quais podem ser importantes recursos na interpretação dos resultados.

Dentre os métodos diretos, uma melhor compreensão da propagação da onda em meios geologicamente complexos tem sido obtida através da técnica de diferenças finitas que vem sendo cada vez mais difundida à medida que os computadores aumentam seu poder de processamento, uma vez que essa técnica é onerosa em termos de tempo computacional (CARCIONE; HERMAN; KROODE, 2002).

Sucintamente em termos matemáticos, o método de diferenças finitas é a substituição das derivadas parciais por aproximações baseadas na expansão das séries de Taylor de funções

[1] Segundo Duarte (1997), consiste na ciência dedicada ao estudo das deformações e fluxo dos materiais.
[2] Segundo Duarte (1997), significa instantes de propagação. São imagens instantâneas ou congeladas do campo de onda.

próximas ao ponto de interesse. Uma revisão bibliográfica do método de diferenças fintas pode ser encontrada em Silva Neto (2004).

É válido ressaltar que o presente trabalho não envolve um estudo da técnica de modelagem por diferenças finitas propriamente dita e sim um meio para a geração dos dados para o processamento sísmico, porém abordagens mais detalhadas desta técnica podem ser encontradas em Alford, Kelly e Boore (1974), Levander (1988), Carcione, Herman e Kroode, (2002), Silva Neto (2004), entre outros.

Serão mostrados nesse trabalho, os dados gerados pelas modelagens acústica e elástica 2D realizadas através da técnica por diferenças finitas de segunda ordem no tempo e no espaço (caso acústico) e de segunda ordem no tempo e oitava ordem no espaço (caso elástico), respectivamente, para os modelos sintéticos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões, respectivamente. Os parâmetros utilizados nas modelagens acústica e elástica 2D, e os parâmetros de aquisições 2D para os modelos I e II, encontram-se listados na Tabela 3-1.

3.1 MODELAGENS ACÚSTICA E ELÁSTICA 2D

Nas últimas décadas tem ocorrido um grande interesse em entender a propagação da onda elástica e em melhor explorar as informações que as ondas cisalhantes (ondas S) fornecem devido a dois progressos recentes na exploração petrolífera. Primeiro é a crescente exploração de áreas com estruturas complicadas e de grandes contrastes de velocidade, tais como depósitos de sal e intrusões magmáticas. Segundo é o crescente interesse em levantamento multicomponente de dados sísmicos, conforme House, Larsen e Bednar (2000).

Qin et al. (1997), mostraram que as simulações elásticas 2D poderiam ser consideradas como sendo uma ferramenta poderosa para identificar corretamente as ondas cisalhantes (convertidas); mostraram também que as ondas cisalhantes fornecem informações seguras para a interpretação de dados sísmicos situados sob corpos de sal, diminuindo dessa maneira, o risco exploratório nesse tipo de ambiente. As ondas cisalhantes quando não identificadas adequadamente, produzem artefatos enganosos levando à realização de interpretações errôneas (HOUSE; LARSEN; BEDNAR, 2000).

As técnicas tradicionais de imageamento e de modelagem sísmica assumem que a Terra pode ser descrita como um meio simples e de meio-espaço acústico. Essa aproximação foi usada

para a geração de um robusto banco de dados SEG/EAGE de modelos numéricos acústicos (ANM), nos quais foram simulados levantamentos sísmicos 3D de modelos sintéticos de sal e com falhas de carreação[3] ou supracavalgamento (e.g., HOUSE et al., 1998). Contudo, a aproximação acústica não descreve precisamente as características importantes da propagação da onda sísmica (LARSEN; GRIEGER, 1998).

A energia acústica é parcialmente convertida em energia elástica na superfície livre[4] e nas interfaces no interior do meio geológico. O contrário também é verdadeiro. Essa energia convertida tem duas conseqüências para o imageamento e para a modelagem sísmica. A primeira conseqüência é o "ruído elástico", onde um sinal elástico é enganosamente interpretado como uma estrutura geológica. Além disso, as amplitudes acústicas são incorretamente modeladas por causa de que parte da energia é perdida para o modo de ondas convertidas. O fenômeno elástico precisa ser modelado e entendido para que desse modo essas armadilhas possam ser evitadas. A segunda conseqüência é que a modelagem elástica contém informações adicionais sobre estruturas geológicas em subsuperfície. Com isso é possível incorporar essas informações em processos de imageamento sísmico, e com isso aumentar a habilidade para resolver questões que envolvam estruturas complexas (LARSEN; GRIEGER, 1998; HOUSE; LARSEN; BEDNAR, 2000; MARTIN, 2004).

A simulação da propagação da onda pode ser descrita pela equação da onda acústica ou pela equação elástica da onda. Em uma simulação acústica considera-se o meio como sendo fluido, ocorrendo somente a propagação das ondas compressionais (ondas P); já na simulação elástica considera-se o meio como sendo sólido, ocorrendo a propagação de ambas as ondas compressional e cisalhante, e implicitamente os seus modos convertidos (HOUSE; LARSEN; BEDNAR, 2000; MARTIN, 2004, IKELLE; AMUNDSEN, 2005).

Com o objetivo de estudar os problemas do imageamento sísmico existentes nas bacias paleozóicas brasileiras, Amazonas e Solimões conforme descrito no capítulo 2, foram gerados dados sísmicos acústicos e elásticos de ambos os modelos representativos das bacias supracitadas através da técnica de diferenças finitas.

---

[3] Em inglês diz-se *overthrust*; segundo Duarte (1997), falha geológica reversa, de baixo ângulo, com significativo deslocamento da capa.

[4] Em inglês diz-se *free surface*; segundo Duarte (1997), é a superfície de uma camada líquida ou sólida sujeita apenas à pressão atmosférica.

3.2 GERAÇÃO DOS DADOS ACÚSTICO E ELÁSTICO 2D

Neste trabalho, a partir de um levantamento com geometria do tipo *split spread*[5] composto por 200 fontes e 390 receptores foram gerados 200 sismogramas de família fonte comum ao longo da linha sísmica de 20.000 metros (Figuras 3-1). A primeira e a última fonte estão situadas nas coordenadas 5.000 e 15.000 metros, respectivamente. A distância entre as fontes e os receptores consecutivos é de 50 metros e de 25 metros, respectivamente. O *offset*[6] mínimo e máximo entre a fonte e o receptor é de 150 metros e de 5.000 metros, respectivamente. O número de amostras é de 1501 a cada 0,002 s, perfazendo um tempo total de registro de 3 segundos. Mais detalhes quanto aos demais parâmetros utilizados na aquisição dos dados encontram-se listados na Tabela 3-1.

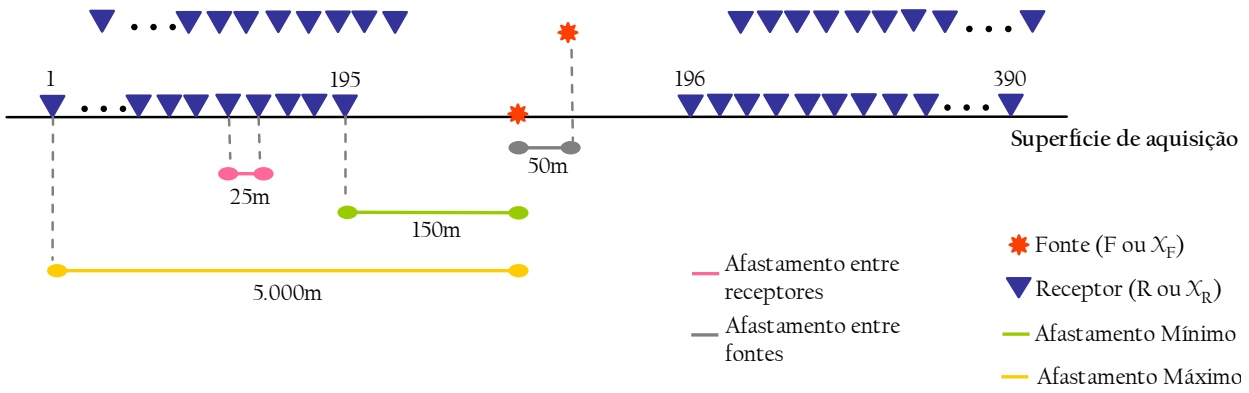


Figura 3-1: Desenho esquemático referente ao tipo de lanço e levantamento utilizado nas aquisições acústicas e elásticas dos modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões, respectivamente.

As figuras 3-2 e 3-3 mostram os sismogramas de família fonte comum que estão situados na posição 8.000 metros e possuem cobertura máxima de 390 traços intervalados a cada 25 metros. Na Figura 3-2 são mostrados os sismogramas de família fonte comum referentes aos dados, acústico (a) e elástico (b), obtidos a partir do Modelo I – Bacia do Amazonas. Na Figura 3-3 são mostrados os sismogramas de família fonte comum referentes aos dados, acústico (a) e elástico (b), obtidos a partir do Modelo II – Bacia do Solimões.

Também como resultado das modelagens acústica e elástica, pode-se observar nas Figuras 3-4 e 3-5 as seções *offset* mínimo (150 metros) modeladas pela técnica de diferenças finitas; essas

[5] Segundo Duarte (1997), consiste em um método de registro sísmico no qual o ponto de tiro ocupa uma posição aproximadamente central em relação às estações receptoras.
[6] Segundo Duarte (1997), consiste, para a sísmica, na distância horizontal da fonte ao centro da estação receptora.

seções serão utilizadas como base para comparações com os demais resultados das simulações realizadas com as técnicas de imageamento.

Na Figura 3-4 são mostradas as seções *offset* mínimo (150 metros) referentes respectivamente aos dados acústico (b) e elástico (c), obtidos a partir do Modelo I – Bacia do Amazonas. Observa-se que as seções *offset* mínimo, tanto acústica como elástica, são bastante representativas do modelo proposto no capítulo 2 representativo da Bacia supracitada (seção 2.3.1, Figura 2-9) sendo mostradas as problemáticas que igualmente ocorrem nos dados reais; em ambas as seções, nos intervalos de tempo de 0s a 0,7s, os contatos das Unidades I e II (arenito-siltito), I e S0 (arenito-diabásio), bem como II e S0 (siltito-diabásio), conforme indicados na Figura pela seta amarela apresentam-se bem delimitados, os demais contatos têm suas visualizações interferidas pela ocorrência de reflexões múltiplas que se sobrepõem às reflexões primárias.

Na Figura 3-5 são mostradas as seções *offset* mínimo (150 metros) referentes, respectivamente, aos dados acústico (b) e elástico (c), obtidos a partir do Modelo II – Bacia do Solimões. Observa-se que as seções *offset* mínimo, tanto acústica como a elástica, são bastante representativas do modelo proposto no capítulo 2 representativo da Bacia supracitada (seção 2.3.1, Figura 2-10) sendo mostradas as problemáticas que igualmente ocorrem nos dados reais; em ambas as seções, nos intervalos de tempo de 0s a 0,7s, os contatos das Unidades I e II (argilito-arenito), II e S0 (arenito-diabásio), II e IIIa (arenito-siltito) e, IIIa e S0 (siltito-diabásio) conforme indicado na Figura pela seta amarela são bem delimitados; os demais contatos têm suas visualizações interferidas pela ocorrência de reflexões múltiplas que se apresentam sobrepostas às reflexões primárias. É válido ressaltar que o falhamento que ocorre entre 10.000 e 11.000 metros pode ser sutilmente notado na seção acústica (b), enquanto que na seção elástica não se consegue identificar essa feição.

Tabela 3-1: Parâmetros utilizados na modelagem e aquisição de dados sísmicos para Modelos I - Bacia do Amazonas e II - Bacia do Solimões.

PARÂMETROS		**MODELO I**	**MODELO II**
Dimensões	x	20.000 m	
	z	4.000 m	
Freqüência	$f_{máx}$	50 Hz	40 Hz
	f_{dom}	25 Hz	20 Hz
Velocidade da Onda P	$Vp_{mín}$	2.000 m/s	1750 m/s
	$Vp_{máx}$	6200 m/s	6150 m/s
Velocidade da Onda S	$Vs_{mín}$	1000 m/s	720 m/s
	$Vs_{máx}$	3580 m/s	3551 m/s
Densidade	$\rho_{mín}$	2,04 g/cm^3	
	$\rho_{máx}$	2,75 g/cm^3	2,98 g/cm^3
Espaçamento da malha (Δx)		5 m	
Número de pontos da malha	horiz.	4001 pt	
	vert.	801 pt	
Tipo de Fonte		Direcional	
Pulso		Blackman Harris	
Tempo total de registro		3 s	
Número de amostras (ns)		1501	
Intervalo de amostragem temporal dos sismogramas		0,002 s	
Cobertura (número de traços/disparos)		390 traços	
Intervalo entre fontes		50 m	
Coordenada da primeira fonte		5.000 m	
Coordenada da última fonte		15.000 m	
Número total de disparos		200	
Intervalo entre receptores		25 m	
Número de receptores		390	
Geometria do lanço		*Split spread*	
***Offset* Mínimo**		150 m	
***Offset* Máximo**		5.000 m	

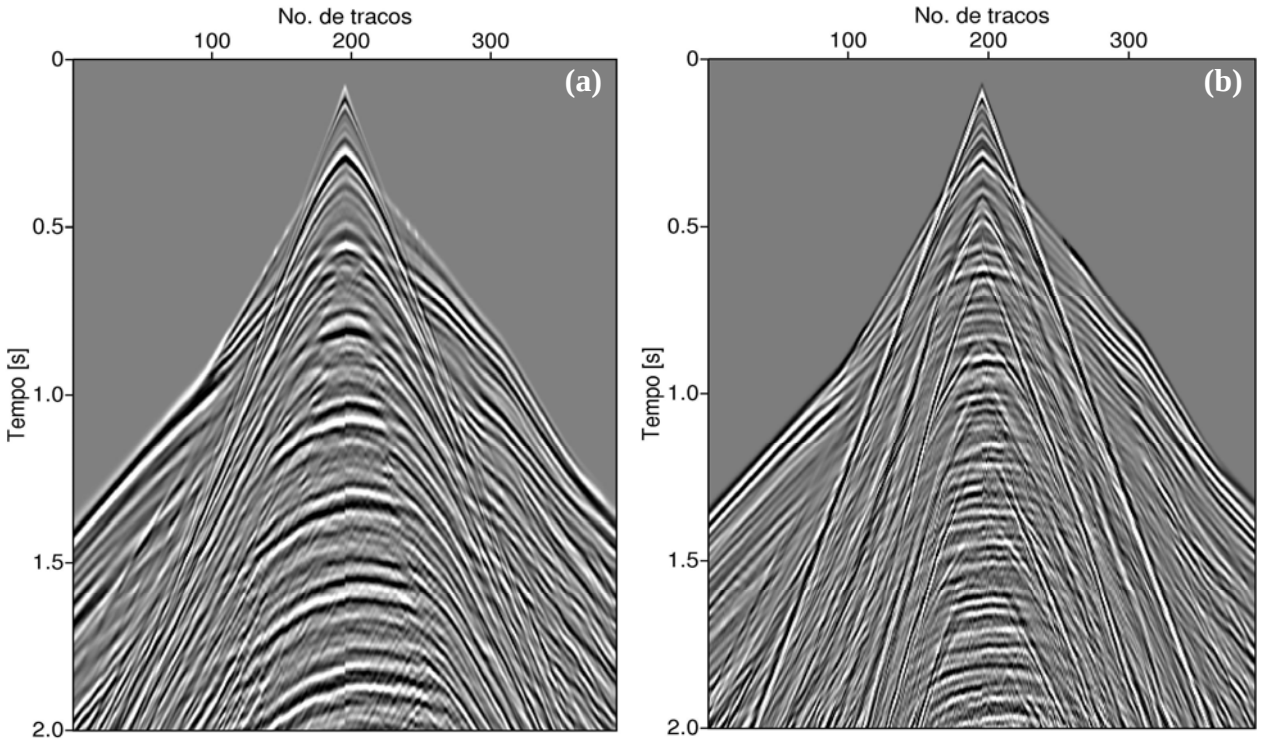


Figura 3-2: Sismogramas de família fonte comum, gerados a partir do modelo I representativo da Bacia do Amazonas, cuja fonte encontra-se na distância de 8.000m. (a) Sismograma acústico; (b) Sismograma elástico. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

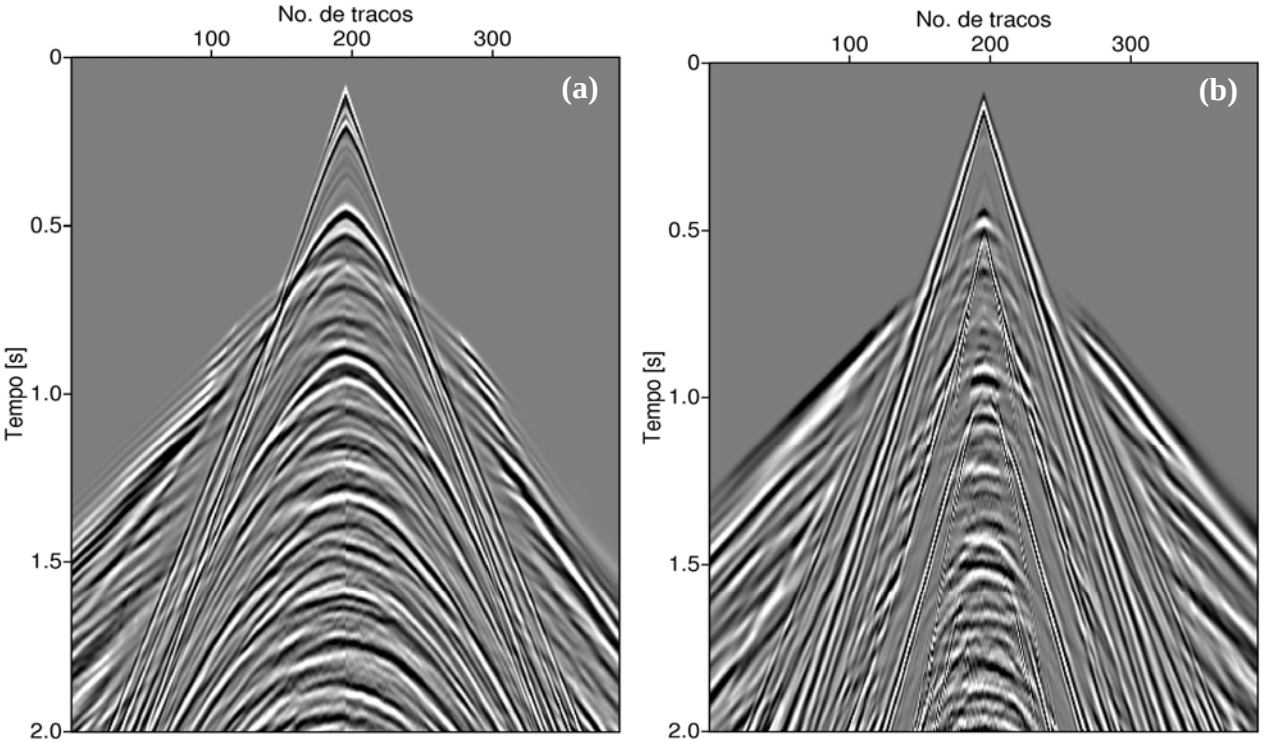


Figura 3-3: Sismogramas de família fonte comum, gerados a partir do modelo II representativo da Bacia do Solimões, cuja fonte encontra-se na distância de 8.000m. (a) Sismograma acústico; (b) Sismograma elástico. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

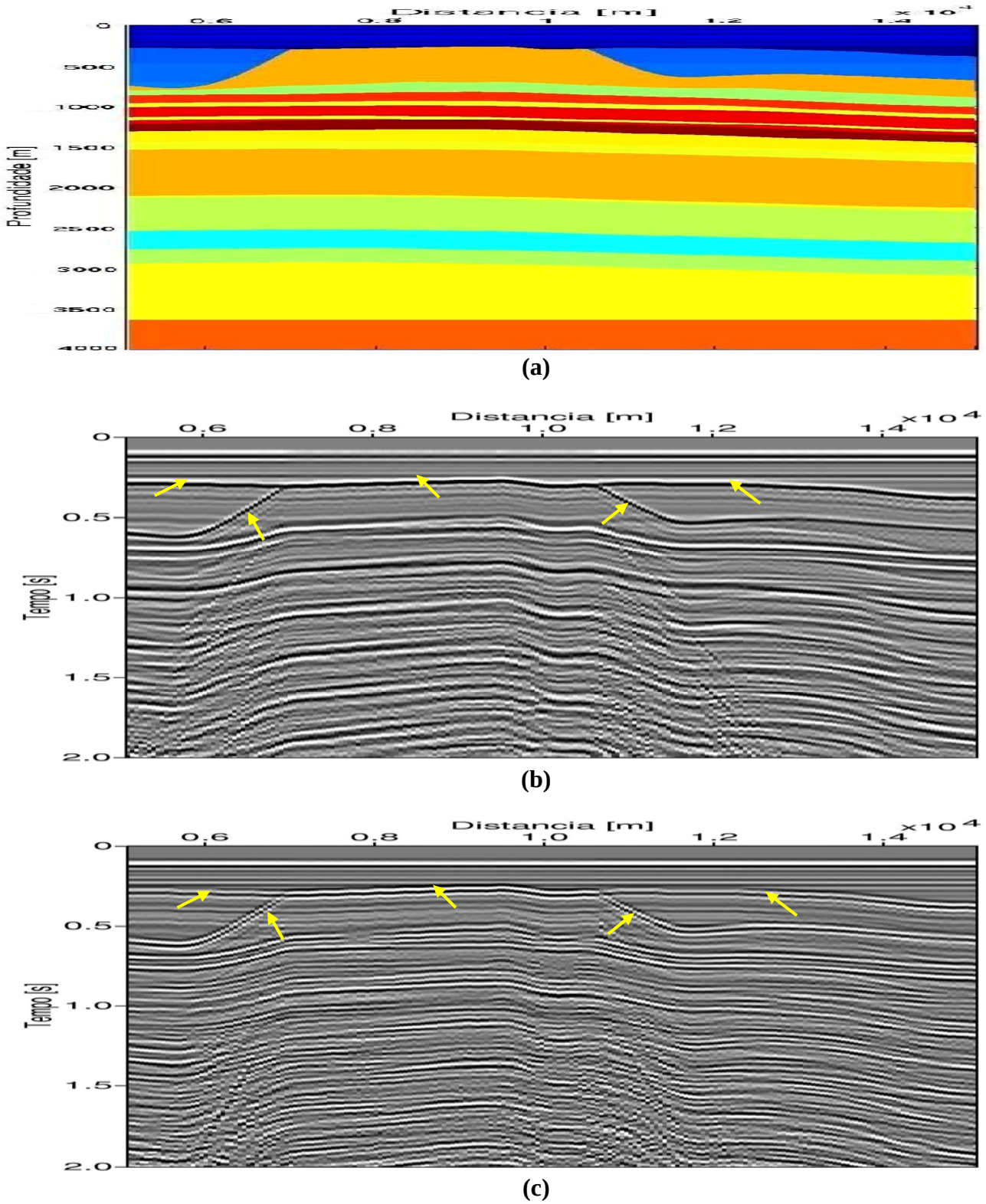


Figura 3-4: Seções *offset* mínimo (150 metros) modeladas geradas com base nas características do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Modelo de velocidades da onda P; (b) Seção acústica; (c) Seção elástica. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s. As setas em amarelo representam os contatos melhor iluminados.

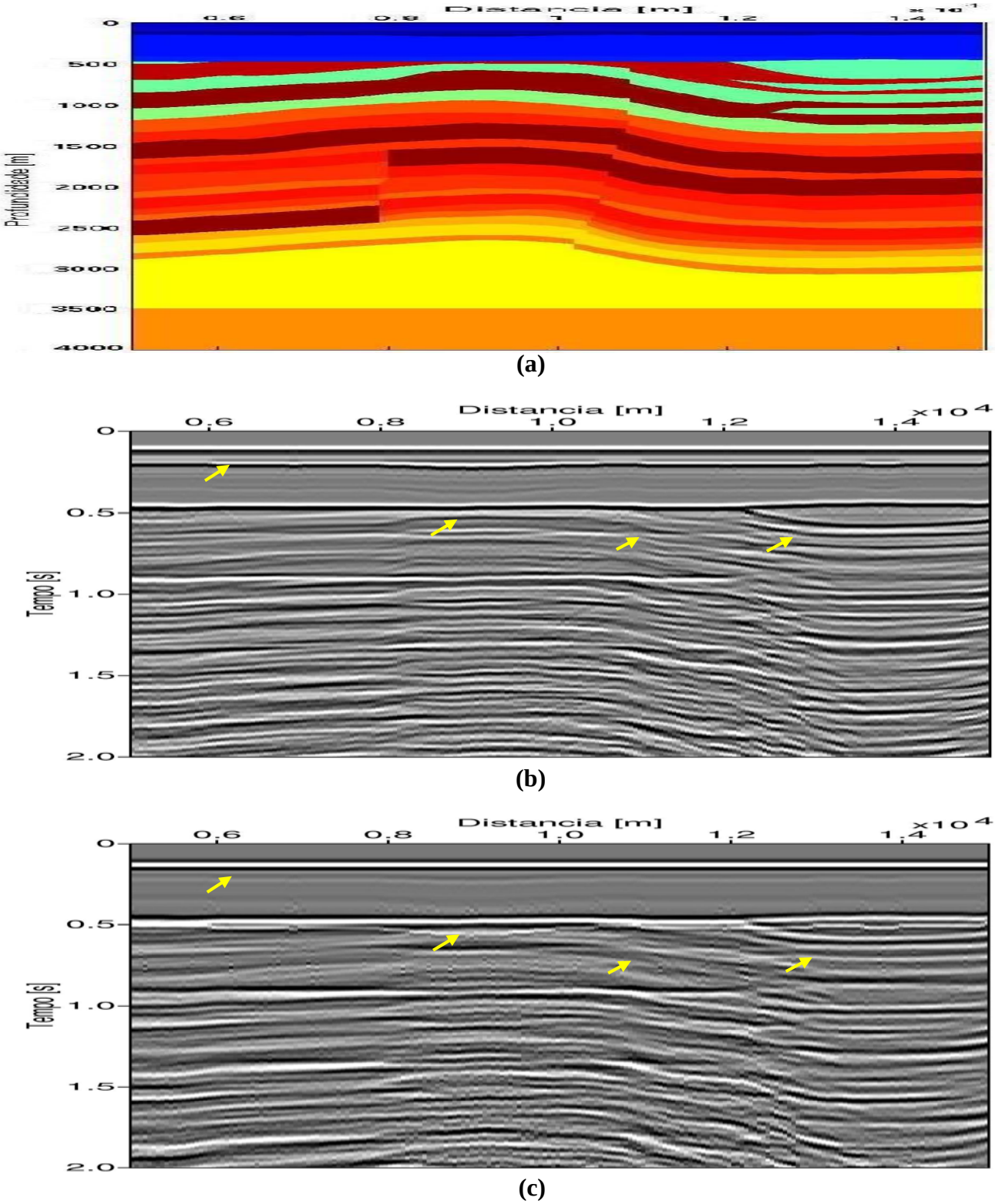


Figura 3-5: Seções *offset* mínimo (150 metros) modeladas geradas com base nas características do modelo II representativo Bacia do Solimões. (a) Modelo de velocidades da Onda P; (b) Seção acústica; (c) Seção elástica. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s. As setas em amarelo representam os contatos melhor iluminados.

4 MÉTODO DE EMPILHAMENTO PONTO MÉDIO COMUM 2D (PMC-2D)

O processamento de dados sísmicos de reflexão tem por objetivo produzir como saída uma seção sísmica que resulta da aplicação de uma série de operações nos dados registrados no campo, de tal forma que essa seção represente da maneira mais clara possível as feições geológicas existentes em subsuperfície.

O método de empilhamento ponto médio comum (CMP - *common midpoint*) é um método de imageamento no domínio do tempo para a simulação de seções de afastamento nulo (ZO - *zero offse*t) a partir de dados sísmicos com múltipla cobertura[1] (Figura 4-1a). Este método utiliza como único parâmetro, as velocidades de empilhamento que são determinadas pelo processo interativo de análise de velocidades realizada nos sismogramas de família CMP. Após serem aplicadas as correções dinâmicas NMO (*normal-moveout*) e DMO (*dip-moveout*), os traços sísmicos dos sismogramas de família CMP são somados resultando num único traço por sismograma de família CMP considerado como o equivalente a um traço com fonte-receptor coincidente ou de afastamento nulo (ZO).

No empilhamento CMP, cada família de traços CMP é transformada num único traço que é considerado como o equivalente ao traço que seria obtido com a fonte e o receptor no ponto médio da seção CMP, resultando assim, num conjunto de traços que conformam a seção afastamento nulo (ZO), onde somente os eventos de reflexão correspondentes aos refletores horizontais (na escala de um sismograma de família CMP) correspondem a um mesmo ponto de reflexão (Figura 4-1a). Por outro lado, o empilhamento CMP realça as reflexões primárias suprimindo os ruídos existentes no sinal sísmico, e também produz atenuação das reflexões múltiplas. Este processo de transformação dos dados no domínio ponto médio comum (CMP) para o domínio afastamento nulo (ZO) pode ser resumido nas seguintes operações: identificação das reflexões primárias no sinal sísmico dos sismogramas de família CMP, análise de velocidades, aplicação da correção NMO (*normal moveout*) a fim de compensar o atraso nos tempos de trânsito das reflexões primárias, e o empilhamento horizontal dos traços sísmicos com diferentes afastamentos.

A análise de velocidades pode ser realizada em cada seção ou em grupos de sismogramas

[1] Em inglês diz-se *multiple coverage*; segundo Duarte (1997), consiste ser um método de levantamento de reflexão sísmica no qual cada ponto de subsuperfície é registrado, redundantemente, com diferentes distâncias fonte-receptor.

de família CMP, e está baseada em medidas de coerência (*semblance*) do sinal ao longo das trajetórias hiperbólicas, que são dependentes da velocidade e do afastamento. Dessa forma, obtem-se as funções de velocidades *versus* o tempo duplo de afastamento nulo, cuja interpolação espacial resulta no modelo de velocidade do perfil sísmico (ŸILMAZ, 1987). Posteriormente, usando o modelo de velocidades obtido pela análise de velocidades, nos traços de cada sismograma de família CMP é aplicada a correção NMO que corrigem as diferenças entre os tempos de trânsito das reflexões atuais e seus correspondentes tempos duplos de afastamento nulo.

A correção NMO embasa-se na suposição de que a subsuperfície é composta por camadas planas, homogêneas e sobrepostas. Na presença de refletores inclinados, esta correção se torna ineficiente devido ao fato de que não ser mais cumprida a amostragem do mesmo ponto refletor da interface em subsuperfície (Figura 4-1b); portanto, os eventos de reflexão dos traços sísmicos resultantes do empilhamento das famílias CMP não têm incidência normal e como conseqüência, a seção empilhada perde resolução em meios com refletores de mergulhos acentuados. As principais restrições do processamento CMP, com a utilização da correção NMO no empilhamento sísmico são que, o afastamento fonte-receptor deve ser pequeno e os refletores devem ser plano-horizontais ou com ângulo de mergulho baixo (ŸILMAZ, 1987). Para reflexões com grandes afastamentos e nas reflexões mais rasas, a correção NMO produz uma distorção no conteúdo de freqüências de sinal sísmico. No caso de meios com refletores fortemente inclinados a segunda condição é violada, e a hipótese de amostragem de um único ponto em profundidade é comprometida devido à dispersão dos pontos de reflexão nas interfaces inclinadas.

A aplicação da correção DMO que corrige os efeitos dos ângulos de mergulho, permite empilhar refletores com mergulhos distintos, produzindo dessa forma, uma seção de afastamento nulo (ou de incidência normal) bastante satisfatória a partir dos dados registrados com afastamento diferente de zero, mesmo em áreas com mergulho acentuado. No entanto, a correção DMO também possui sérias limitações em meios com fortes gradientes laterais de velocidade (ŸILMAZ, 1987).

Geralmente, após essas correções é aplicado o processo de silenciamento (*muting*) para anular ou zerar as partes não desejadas dos traços sísmicos. Por último, é aplicado o processo de empilhamento horizontal que consiste no somatório das amplitudes dos traços contribuintes de

cada seção CMP resultando em um único traço de afastamento nulo, isto é, fontes e receptores hipoteticamente coincidentes (AL-SADI, 1982).

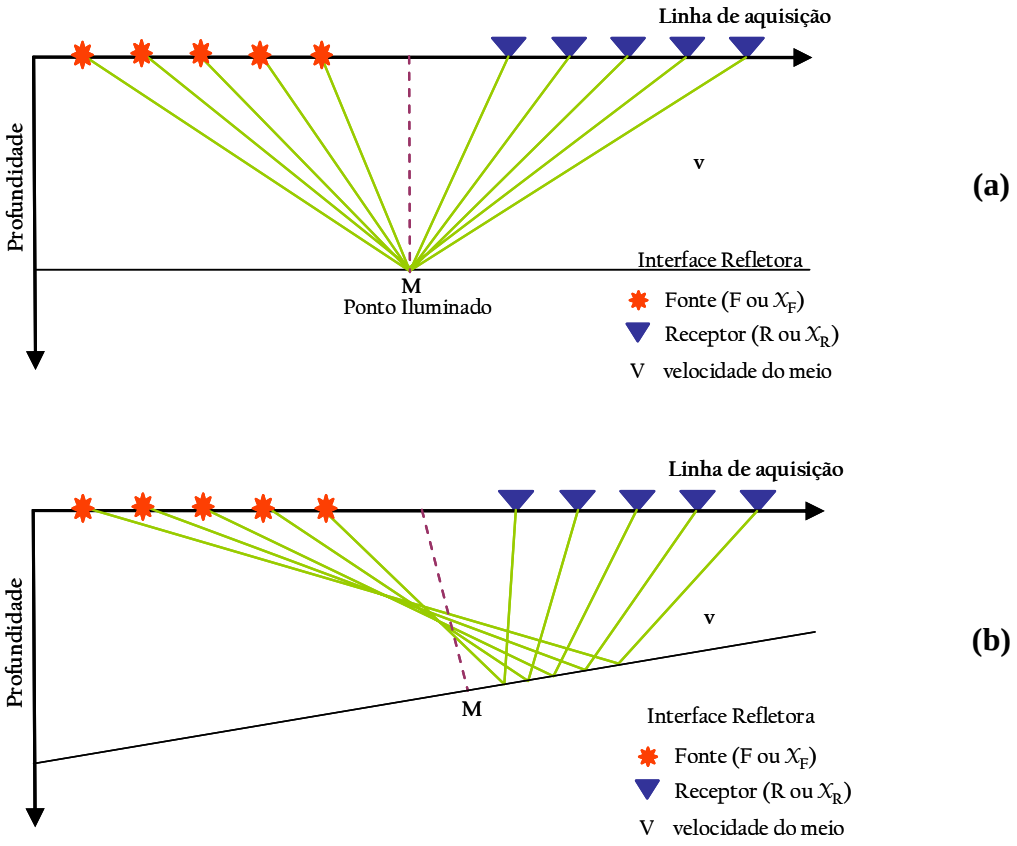


Figura 4-1: Desenho esquemático de um modelo constituído de uma camada com velocidade constante e com uma interface refletora sobre um semi-espaço. (a) configuração CMP, onde os pontos de reflexão dos raios iluminam o mesmo ponto (M) na interface refletora horizontal; (b) pontos de reflexão dos raios iluminando vários pontos na interface refletora inclinada
Fonte: modificado de Ÿilmaz (1987).

4.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO PMC NOS DADOS SINTÉTICOS

O processamento sísmico convencional CMP dos dados acústicos e elásticos gerados a partir dos Modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões respectivamente, foram realizados com base nos diferentes processos citados anteriormente (os *scripts* utilizados encontram-se no Apêndice A e listados na Tabela 4-1) e conforme mostrado no fluxograma ilustrado na Figura 4-2. Para realizar os diferentes processos do método CMP utilizou-se o programa de processamento sísmico *Seismic Unix* (SU) (COHEN; STOCKWELL JR., 2000). Os

resultados obtidos são seções afastamento nulo (ZO) que são apresentadas nas Figuras 4-3, 4-4, 4-5 e 4-6.

No pré-processamento dos dados foram realizadas as etapas de geometria, aplicação dos filtros passa-banda, f-k e deconvolução. Na etapa da geometria foi incorporado aos traços a geometria do levantamento na forma de cabeçalhos contendo as informações sobre coordenada da fonte e do receptor, número de tiro, afastamento, número de CDP entre outras informações. Os filtros passa-banda e f-k foram aplicados, respectivamente, com o objetivo de suprimir freqüências baixas e altas e para remover o *ground roll*. A deconvolução foi aplicada com o principal objetivo de suprimir as reverberações existentes com o intuito de minimizar o grau de dificuldade para a realização da análise de velocidades uma vez que esses dados apresentam muitas reflexões múltiplas.

Uma vez os dados pré-processados, a outra etapa executada foi a análise de velocidades. Para a realização desta etapa foram feitas análises em 21 seções CMP, onde se tentou favorecer o campo de velocidade das reflexões primárias evitando dessa maneira o campo referente às reflexões múltiplas. Uma vez obtido o campo de velocidade aplicou-se a correção NMO seguido do silenciamento (*muting*) objetivando eliminar os estiramentos dos traços provenientes da correção aplicada; em seguida realizou-se o empilhamento horizontal para a obtenção das seções afastamento nulo (ZO), mostradas nas Figuras 4-3, 4-4, 4-5 e 4-6.

A Figura 4-3 mostra a seção ZO acústica enquanto que a Figura 4-4 apresenta a seção ZO elástica, ambas obtidas no processamento CMP aplicado aos dados representativos da Bacia do Amazonas. Observa-se que, em ambas as figuras, houve um aumento na razão sinal ruído no intervalo de tempo de 0s a 0,9s, no qual podemos constatar os contatos das unidades I com a II, I com o topo da soleira S1, II com o topo da soleira S1; ainda em ambas as figuras, o topo da Soleira S2 se apresenta com boa resolução e continuidade lateral (conforme identificados pelas setas e amarelo), já o topo da Soleira S3 ao contrário dos demais não é possível identificar em ambas as seções. No intervalo de tempo de 1s a 2s, em ambas as figuras, nota-se a presença de reflexões múltiplas que interferem na possível visualização dos contatos das demais unidades em decorrência dessas reflexões apresentarem-se sobrepostas às reflexões primárias.

Na Figura 4-5 e 4-6 são apresentadas as seções ZO, acústica e elástica respectivamente, obtidas pelo processamento CMP aplicado aos dados representativos da Bacia do Solimões. Observa-se que em ambas as figuras houve um aumento na razão sinal ruído no intervalo de

tempo de 0s a 0,7s, no qual podemos constatar os contatos das unidades I com a II, II com a III, II com o topo da soleira S0, III como topo da soleira S0 e a bifurcação da Soleira S0 que se apresentam com boa resolução e continuidade lateral (conforme identificados pelas setas em amarelo), porém o topo e a bifurcação da Soleira S1 ao contrário dos demais são identificados somente na Figura 4-6, a qual representa a versão elástica do dado. No intervalo de tempo de 1s a 2s, em ambas as figuras, ocorrem a presença de reflexões múltiplas que interferem na possível visualização dos contatos das demais unidades em decorrência dessas reflexões apresentarem-se sobrepostas às reflexões primárias.

Os contatos entre as unidades que se encontram destacados tanto nas Figura 4-3 e 4-4 como nas Figuras 4-5 e 4-6 foram definidos conforme o cálculo do tempo levando em consideração a espessura e velocidade de cada camada. Uma melhor descrição das unidades é encontrada no capítulo 2 seção 2.4.1.

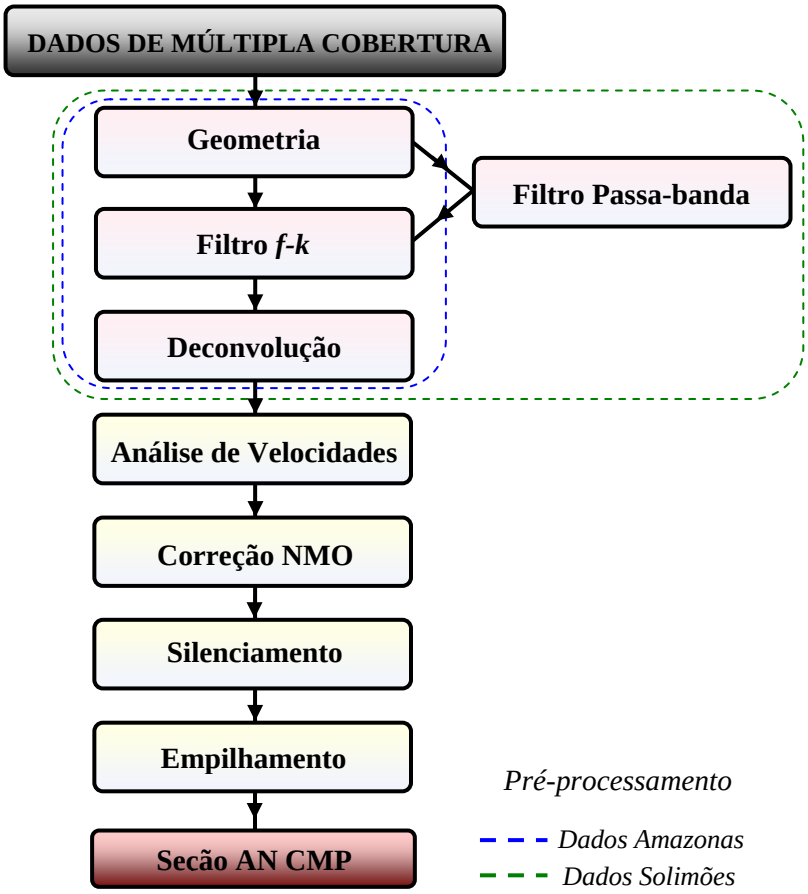


Figura 4-2: Fluxograma de processamento sísmico pela técnica de empilhamento CMP aplicado aos dados acústicos e elásticos representativos da Bacia do Amazonas e do Solimões. As linhas pontilhadas em verde e em azul representam os processos realizados na etapa de pré-processamento
Fonte: modificado de Ÿilmaz (1987).

Tabela 4-1: Principais parâmetros utilizados no pré-processamento e no processamento CMP.

Processos	**Programas / Parâmetros**		
Filtro Passa-banda	*sufilter*	f	10, 20, 50, 60 Hz
Filtro *f-k*	*sudipfilter*	d2	0.025
		slopes	-0.30,-0.20,0.20,0.30
		amps	0,1,1,0
Deconvolução	*supef*	minlag	0.030
		maxlag	0.075
		pnoise	0.008
Análise de velocidades	*suvelan*	nv	440
		dv	10
		fv	1500
		nt	1501
		dt	0.002
Correção NMO	*sunmo*	tnmo	*escolhidos durante a análise de velocidades*
		vnmo	
		cdp	
Silenciamento (*mute*)	*sumute*	key	offset
		tmute	3,0,3
		xmute	-5000,0,5000
Empilhamento	*sustack*	*sismogramas com NMO corrigido e com estiramentos indesejáveis removidos*	
Migração em profundidade	*sumigsplit*	n2	801
		dz	5.0
		dx	50.0

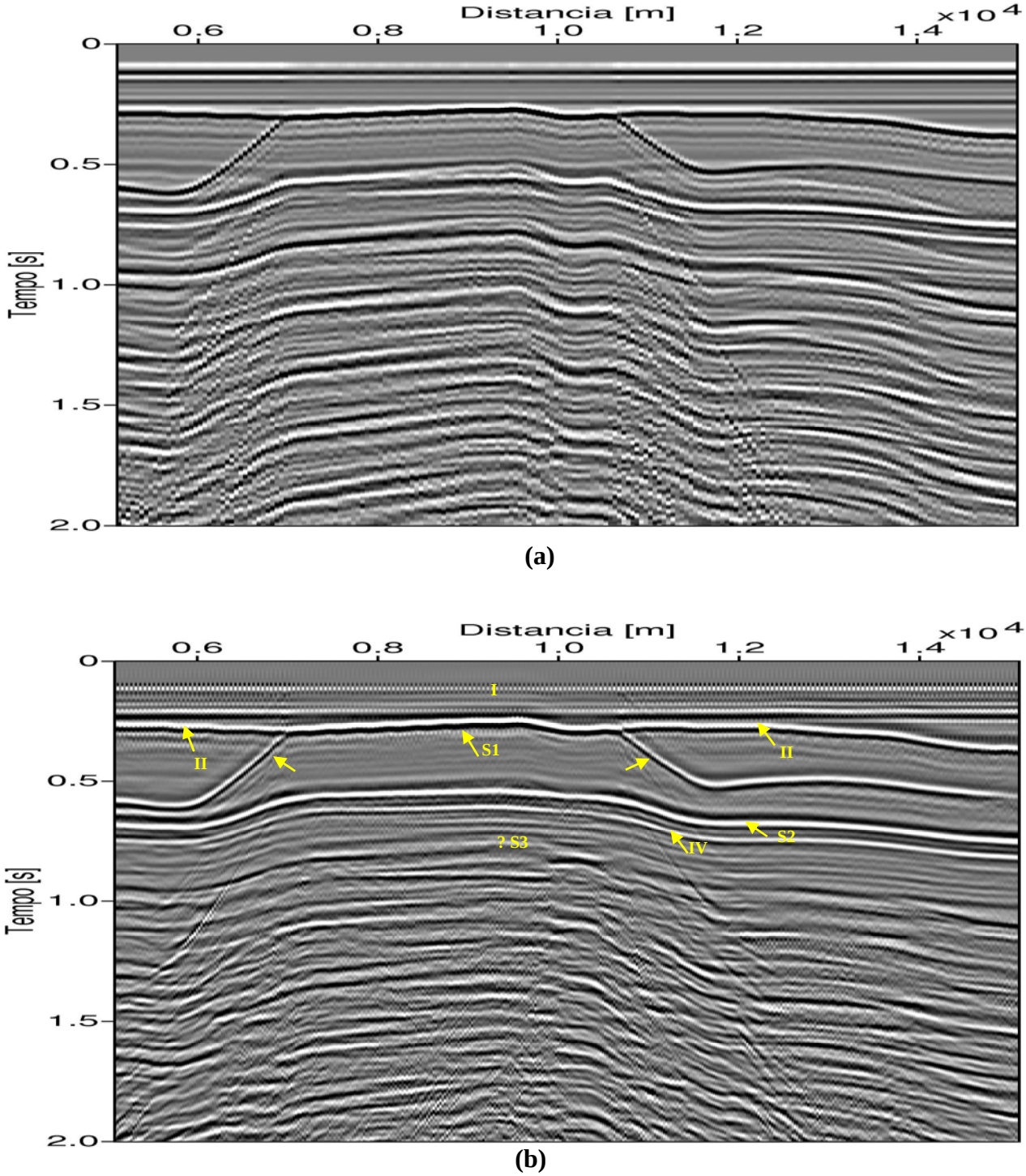


Figura 4-3: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

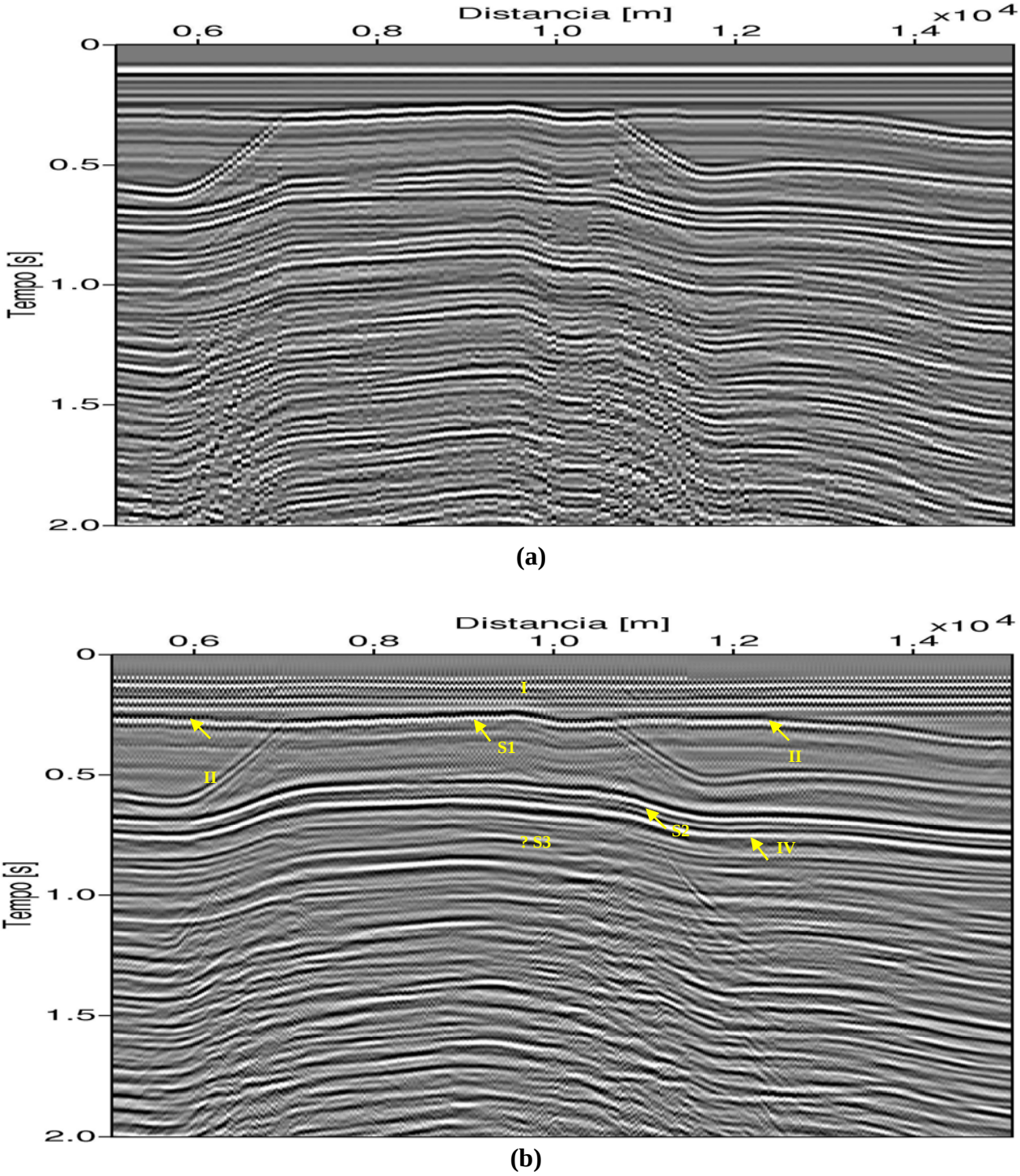


Figura 4-4: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

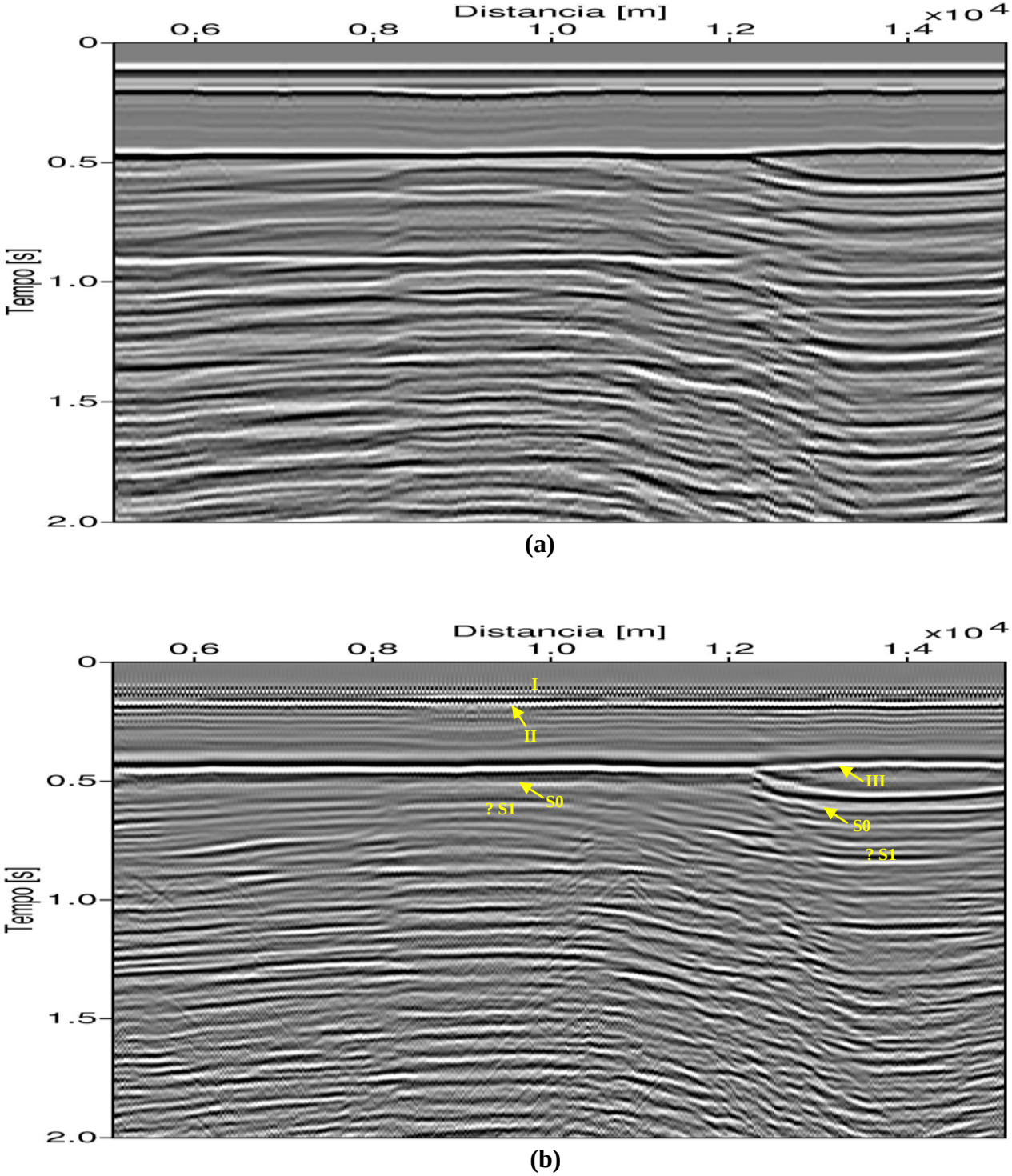
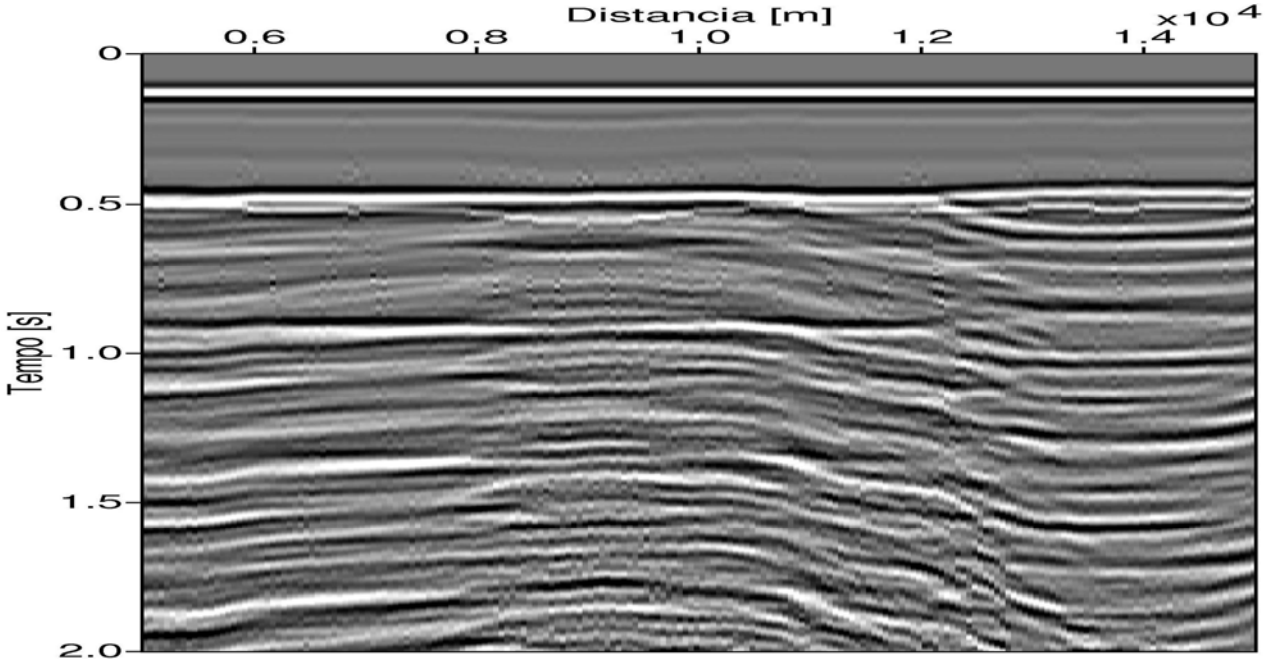
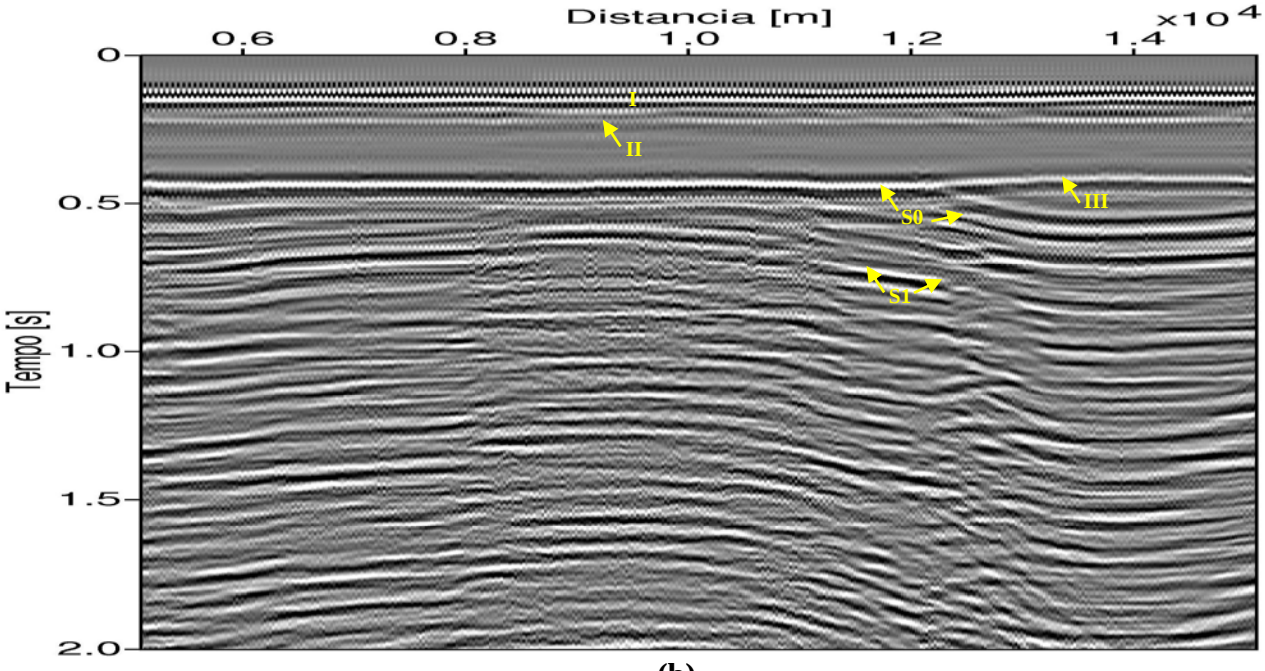


Figura 4-5: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.



(a)



(b)

Figura 4-6: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CMP. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

5 MÉTODO DE EMPILHAMENTO SUPERFÍCIE DE REFLEXÃO COMUM (CRS-2D)

O método de empilhamento superfície de reflexão comum (CRS - *common reflection surface*) é um método que simula uma seção afastamento nulo (ZO - *zero offset*) a partir de dados de cobertura múltipla através do somatório de eventos sísmicos ao longo das superfícies de empilhamento associada a cada ponto de amostragem da seção ZO a ser simulada; além disso, esse método fornece imagens ZO simuladas com as relações sinal/ruído e resolução lateral superiores as apresentadas pelos métodos convencionais devido a eficiência da aproximação paraxial dos tempos de trânsito.

Diferentemente ao que ocorre na técnica de empilhamento ponto médio comum (PMC), que assume reflexões correspondentes a um único ponto refletor em profundidade, a técnica de empilhamento superfície de reflexão comum (CRS) admite reflexões associadas com um elemento refletor em subsuperfície que é caracterizado pela posição, inclinação e curvatura local do refletor.

Os tempos de reflexão das curvas de empilhamento são também descritos por uma aproximação hiperbólica que comparado com a aproximação convencional NMO, não é limitado para uma única família PMC. Essas curvas de empilhamento formam a denominada superfície de empilhamento CRS (para cada ponto de amostragem na seção afastamento nulo a ser simulada), sendo que esta superfície depende de três atributos cinemáticos de frentes de ondas ou atributos CRS, que são determinados a partir dos dados por meio de processos automáticos de busca.

Logo, o método de empilhamento CRS não depende, a priori, do conhecimento de um macro modelo de velocidades, pois uma vez determinados esses atributos e associados a cada ponto de amostragem da seção afastamento nulo (ZO) a ser simulada, o empilhamento das reflexões sísmicas é realizado ao longo das curvas ou superfícies definidas por esses três atributos (β_0, R_{NIP} e R_N), resultando numa seção ZO simulada. Esses parâmetros consistem de um ângulo de emergência (β_0) e de dois raios de curvatura das ondas hipotéticas do ponto de incidência normal NIP e da onda normal N (Figura 5-1).

Na Figura 5-1 observa-se a propagação das duas ondas hipotéticas NIP e N em 2D, num meio formado por duas camadas homogêneas sob um semi-espaço, desde o ponto de incidência normal R sobre o refletor até o ponto de observação x_0 na linha sísmica. A onda NIP é uma onda

hipotética que se propaga em forma ascendente a partir de uma fonte pontual localizada no ponto R. Na Figura 5-1(a), as frentes de ondas de cor azul representam a propagação da onda NIP em diferentes instantes de tempo até atingir o ponto de emergência x_0. A onda N também é uma onda hipotética que se propaga a partir de fontes pontuais distribuídas ao longo do refletor, e ativadas no mesmo instante (modelo do refletor explosivo). Na Figura 5-1(b), as frentes de onda (na cor azul) representam a propagação da onda N em diferentes instantes de tempo e também associados ao raio normal.

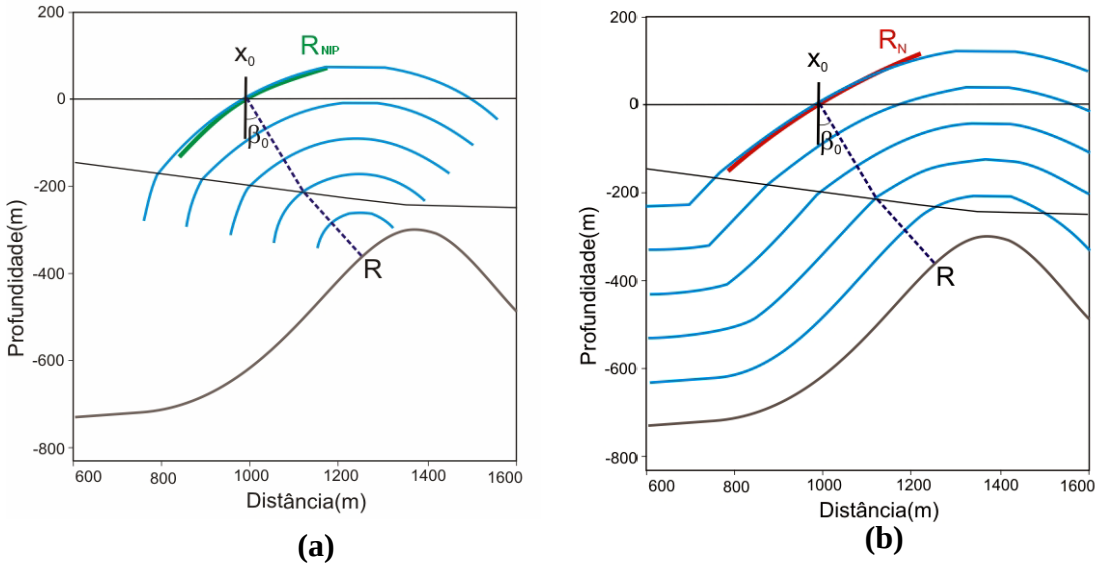


Figura 5-1: Propagação das ondas hipotéticas (a) NIP e (b) Normal em 2D. O raio normal inicia-se em x_0, propaga-se ao longo das camadas, reflete no ponto R e emerge na superfície de medição em x_0. β_0 é o ângulo de emergência do raio normal com a normal à superfície de medição plana. R_{NIP} e R_N são os raios de curvatura das ondas NIP e N
Fonte: (JÄGER et al., 2001).

A determinação dos três atributos de frentes de ondas do método CRS pode ser realizada através de processos automáticos de busca ou otimização baseados em análise de coerência dos dados sísmicos, ou seja, nessa determinação não há interação manual do usuário (indivíduo processador).

Uma das estratégias de busca mais conhecidas na literatura sísmica é denominada de pragmática-extendida, proposta em Mann (2001 e 2002) com base na estratégia desenvolvida por Müller (1998) e Jäger et al. (2001), em que os parâmetros são determinados em um total de cinco etapas, dos quais em quatro etapas são determinados os parâmetros iniciais e em uma última etapa os parâmetros finais. Uma outra estratégia de busca utilizada no método CRS-ZO-2D é

conhecida como global-local, proposta em Garabito Callapino et al. (2001), onde os parâmetros CRS são determinados em três etapas, sendo que nas duas primeiras etapas são determinados os três parâmetros por meio de otimização global e na terceira esses parâmetros são refinados por meio de otimização local. Uma descrição detalhada dos aspectos teóricos e de implementação do método CRS 2D utilizando a estratégia global-local pode ser encontrada em Garabito Callapino (2001) e Paschoal Jr. (2005).

De acordo com Paschoal Jr. (2005), essas duas estratégias de busca citadas anteriormente são fundamentalmente consideradas distintas pelo tipo de configuração sísmica dos dados, pelo número de parâmetros de empilhamento a serem determinados em cada etapa e pelos processos de busca automática (otimização) utilizados em cada etapa do empilhamento CRS. Essas diferenças afetam tanto no tempo computacional como na resolução da imagem final da seção afastamento nulo.

Nesse trabalho, tanto os dados acústicos como os elásticos gerados a partir dos modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões (apresentados no capítulo 2, seção 2.4, Figuras 2-9 e 2-10) foram processados com as estratégias de busca CRS pragmática-extendida e global-local. Através de uma análise comparativa visando uma maior definição e continuidade dos refletores, serão apresentados aqui somente os dados que foram processados através da estratégia de busca CRS global-local desenvolvida por Garabito Callapino (2001).

5.1 OPERADOR DE EMPILHAMENTO CRS-2D

Aproximação do tempo de trânsito CRS 2D é a aproximação hiperbólica, que descreve o tempo de trânsito de raios paraxiais arbitrários na vizinhança de um raio central conhecido em um meio heterogêneo, demonstrada pela teoria paraxial do raio ou pela aproximação geométrica, Höcht et al., (1999 apud PASCHOAL JR., 2005). Essa aproximação hiperbólica pode ser expressa em termos dos parâmetros cinemáticos β_0, R_{NIP} e R_N das auto-ondas NIP e N:

$$t^2(x_m,h)=\left(t_0+\frac{2sen\beta_0}{v_0}(x_m-x_0)\right)^2+\frac{2t_0\,cos^2\,\beta_0}{v_0}\left(\frac{(x_m-x_0)^2}{R_N}+\frac{h^2}{R_{NIP}}\right). \qquad \textbf{(5a)}$$

Esta aproximação do tempo de trânsito CRS independe explicitamente do conhecimento do macro modelo de velocidade. No entanto, o único conhecimento a priori de velocidade para

aproximação do tempo de trânsito CRS é o da velocidade próxima à linha de aquisição v_0, que é suficiente para descrever o tempo de trânsito para um determinado par de fonte-receptor. Assim, com as coordenadas ponto médio (x_m) e o meio-afastamento (h) entre a fonte e o receptor, bem delimitadas, e com o, respectivo, trio de parâmetros cinemáticos β_0, R_{NIP} e R_N bem determinados para um ponto de amostragem P_0 (x_0, t_0), a aproximação do tempo de trânsito CRS define uma superfície de empilhamento CRS (GARABITO CALLAPINO, 2001; PASCHOAL JR., 2005).

Para ilustração de uma superfície de empilhamento CRS definida pela expressão (5a), considera-se o modelo sintético composto por três camadas homogêneas vistas na parte inferior da Figura 5-2. A porção superior desta figura, no domínio (x_m, h), observa-se as curvas dos tempos de trânsito das reflexões primárias (curvas em azul) correspondentes ao segundo refletor que são medidas ao longo da linha sísmica com geometrias de afastamento fonte-receptor comum. As curvas em vermelho compõem a superfície de empilhamento no ponto de amostragem P_0, correspondente a uma reflexão primária no ponto R situado sobre a segunda interface. Neste caso, o trio de atributos das ondas NIP e N associados ao raio normal $X_0 R X_0$, foram calculados por modelagem direta. Pode-se então afirmar que uma superfície de reflexão comum, também chamada de operador de empilhamento CRS, é uma aproximação da resposta cinemática de uma reflexão sobre uma interface curva num meio heterogêneo (GARABITO CALLAPINO, 2001).

De acordo Garabito Callapino (2001), os três atributos cinemáticos das duas ondas hipotéticas fornecem informações sobre: a orientação angular do refletor no ponto de incidência normal, a posição do ponto de reflexão na subsuperfície e a curvatura local do refletor no ponto de incidência do raio normal. Seguindo essa interpretação, se considerarmos o caso particular em que $R_{NIP} = R_N$ significa que o raio de curvatura da onda hipotética N não fornece mais a informação da curvatura do refletor no ponto de incidência normal, significando que os atributos cinemáticos não estão vinculados de forma unívoca a um ponto difrator em subsuperfície. Aplicando esta condição em (5a) obtem-se,

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2\, sin\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2\, t_0 \cos^2\beta_0}{v_0 R_{NIP}} \left((x_m - x_0)^2 + h^2 \right), \qquad \textbf{(5b)}$$

resultando numa expressão dependente de dois atributos cinemáticos (β_0 e R_{NIP}) associados a onda hipotética NIP. Devido ao fato de que β_0 e R_{NIP} fornecerem informações sobre a posição de um ponto na subsuperfície, os tempos de trânsito calculados por (5b) podem ser considerados como aproximações dos tempos de trânsito de uma difração; em outras palavras, a expressão (5b) é uma aproximação na vizinhança do raio central do operador de migração pré-empilhamento.

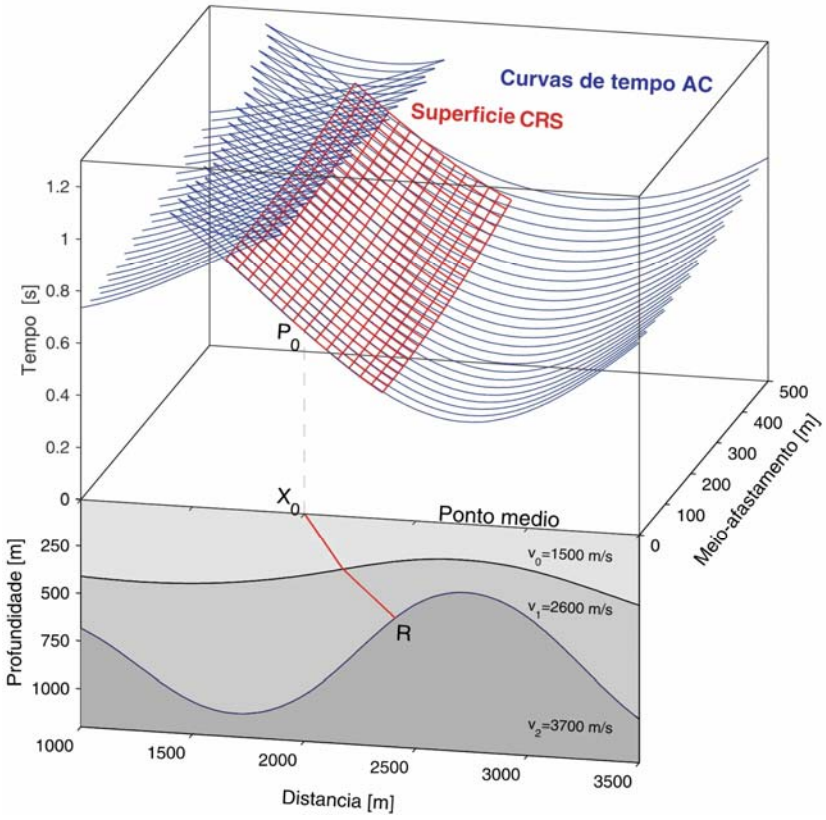


Figura 5-2: Modelo composto por três camadas homogêneas, com um raio de afastamento nulo ou de incidência normal (linha de cor vermelha) (porção inferior). Superfície de cobertura múltipla (linhas de cor azul) correspondente às reflexões da segunda interface (porção superior)
Fonte: (GARABITO CALLAPINO, 2001).

5.2 ALGORITMO CRS-ZO 2D GLOBAL-LOCAL

Para o processamento CRS dos dados acústicos e elásticos sintéticos baseados nos Modelos I e II (Bacia do Amazonas e Solimões, respectivamente) utilizou-se a estratégia de busca CRS-ZO 2D global-local proposta por Garabito Callapino (2001). Essa estratégia consiste de três buscas automáticas para estimar os três parâmetros de empilhamento CRS (β_0, R_{NIP}, R_N). As duas

primeiras buscas são realizadas através de otimização global, a primeira aplicada sobre os dados de cobertura múltipla; e a segunda aplicada à seção afastamento nulo que é obtida como resultado da primeira busca automática. Após os três parâmetros de empilhamento CRS terem sido estimados através das duas buscas por otimização global, eles são utilizados pela otimização local para calcular os três parâmetros ótimos.

Com base na estratégia de busca dos parâmetros CRS descrita anteriormente, Garabito Callapino (2001) propôs o algoritmo a seguir que foi utilizado para a implementação do método de empilhamento CRS-ZO-2D, a ser utilizado nesse trabalho.

5.2.1 **Etapa I: Otimização global pré-empilhamento**

Através do algoritmo de otimização *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983), são determinados um ou dois pares de parâmetros CRS (β e R_{NIP}) por meio de uma busca global bidimensional nos dados de cobertura múltipla. De acordo com Paschoal Jr. (2005), esses pares de parâmetros CRS (β e R_{NIP}) determinados correspondem a um extremo global e um extremo local, sendo que o extremo local está associado a cruzamento de eventos na seção afastamento nulo. A determinação e o registro desse par de parâmetros CRS relacionados ao extremo local dependem do critério de coerência (*Semblance*). Os resultados obtidos nessa etapa são duas seções referentes à coerência, duas seções do parâmetro CRS ângulo de emergência - $\beta_{0,}$ duas seções referentes ao parâmetro CRS raio de curvatura da frente de onda do ponto de incidência normal - R_{NIP}, e uma seção afastamento nulo simulada.

5.2.2 **Etapa II: Otimização global pós-empilhamento**

Nesta etapa, ainda utilizando o algoritmo de otimização *Simulated Annealing*, é determinado o terceiro parâmetro CRS que é o raio de curvatura da frente de onda normal - R_N, através de uma busca unidimensional na seção afastamento nulo simulada na etapa anterior. Os resultados obtidos nessa etapa são duas seções intermediárias referentes à coerência e duas seções iniciais referentes ao parâmetro CRS raio de curvatura da frente de onda normal - R_N; é válido

ressaltar que essas seções são geradas para os extremos globais e para os extremos locais encontrados.

5.2.3 **Etapa III: Otimização local pré-empilhamento**

Nesta última etapa, utiliza-se o algoritmo de otimização local *Quase-Newton* (GILL; MURRAY; WRIGHT, 1981), para realizar uma busca local tridimensional nos dados de múltipla cobertura, cujo objetivo é de determinar os valores ótimos dos três parâmetros CRS e obtermos a melhor superfície de empilhamento CRS. De acordo com Paschoal Jr. (2005), essa busca local nos dados de múltipla cobertura utiliza os valores iniciais dos parâmetros CRS (β_0, R_{NIP}, R_N) obtidos nas duas etapas anteriores e que correspondem aos extremos globais e locais relacionados à seção afastamento nulo. Concluída terceira e última etapa da estratégia de busca global-local, os resultados obtidos são duas seções referentes à coerência, duas seções otimizadas referentes ao parâmetro CRS β, duas seções otimizadas referentes ao parâmetro CRS R_{NIP}, duas seções otimizadas referentes ao parâmetro CRS R_N e uma seção afastamento nulo simulada.

5.3 APLICAÇAO DO MÉTODO CRS NOS DADOS SINTÉTICOS

O processamento sísmico não-convencional CRS dos dados acústicos e elásticos gerados a partir dos Modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões respectivamente, foi realizado através da estratégia de busca global-local (GARABITO CALLAPINO, 2001; PASCHOAL JR., 2005), cujos processos encontram-se descritos na subseção 5.2 e conforme mostrado no fluxograma ilustrado na Figura 5-3.

O pré-processamento dos dados a serem submetidos ao processamento CRS é semelhante ao que foi realizado no processamento CMP e que se encontram descritos no capítulo 4 subseção 4.1.

Como resultados da aplicação do método CRS foram obtidas seções afastamento nulo (ZO) que são apresentadas nas Figuras 5-4 e 5-5. Os parâmetros de abertura do operador foram escolhidos a partir dos sismogramas de famílias CMP bem como afastamento comum, que após alguns testes foram definidos os que forneciam uma melhor continuidade lateral dos eventos. Os

parâmetros utilizados para processar os dados presentes neste trabalho encontram-se listados na Tabela 5.1. Com o propósito de fazer uma comparação válida entre os dados acústicos e elásticos de cada um dos modelos representativos utilizados neste trabalho foram utilizados, em ambos os dados, os mesmos parâmetros de processamento.

A Figura 5-4 mostra a seção ZO acústica enquanto que a Figura 5-5 apresenta a seção ZO elástica, ambas obtidas no processamento CRS aplicado aos dados representativos da Bacia do Amazonas. Observa-se que em ambas as Figuras houve um aumento na razão sinal ruído no intervalo de tempo de 0s a 0,9s. Pode-se constatar boa resolução nos contatos das unidades I com o topo da soleira S1, II com o topo da soleira S1; o contato da unidade I com a II não apresenta boa resolução, porém ainda melhor à apresentada na Figura 5-5. Já o topo da soleira S2 apresenta-se com boa resolução e continuidade lateral (conforme identificados pelas setas amarelas) e o topo da soleira S3 em nenhuma das Figuras é identificado.

Na Figura 5-6 e 5-7 são apresentadas as seções ZO, acústica e elástica respectivamente, obtidas pelo processamento CRS aplicado aos dados representativos da Bacia do Solimões. Observa-se que em ambas as Figuras houve um aumento na razão sinal ruído no intervalo de tempo de 0s a 0,7s. Pode-se constatar boa resolução e continuidade lateral (conforme identificados pelas setas amarelas) nos contatos das unidades II com a III, II com o topo da soleira S0, III como topo da soleira S0, bem como a bifurcação nela existente; o contato da unidade I com a II apresenta maior definição na Figura 5-7 se comparado com a seção (a). O topo e a bifurcação da Soleira S1 ao contrário dos demais são identificados somente na seção (b) apresentada nesta mesma Figura, a qual representa a versão elástica do dado.

Em ambas as figuras observa-se que no intervalo de tempo de 1s a 2s ocorrem a presença de reflexões múltiplas que interferem na possível visualização dos contatos das demais unidades em decorrência dessas reflexões apresentarem-se sobrepostas às reflexões primárias. Além disso, nota-se também que em ambas as Figuras, o método CRS realçou as reflexões múltiplas.

Os contatos entre as unidades que se encontram destacados tanto nas Figuras 5-4 e 5-5 como nas Figuras 5-6 e 5-7 foram definidos conforme o cálculo do tempo levando em consideração a espessura e velocidade de cada camada. Uma melhor descrição das unidades é encontrada no capítulo 2 seção 2.4.1.

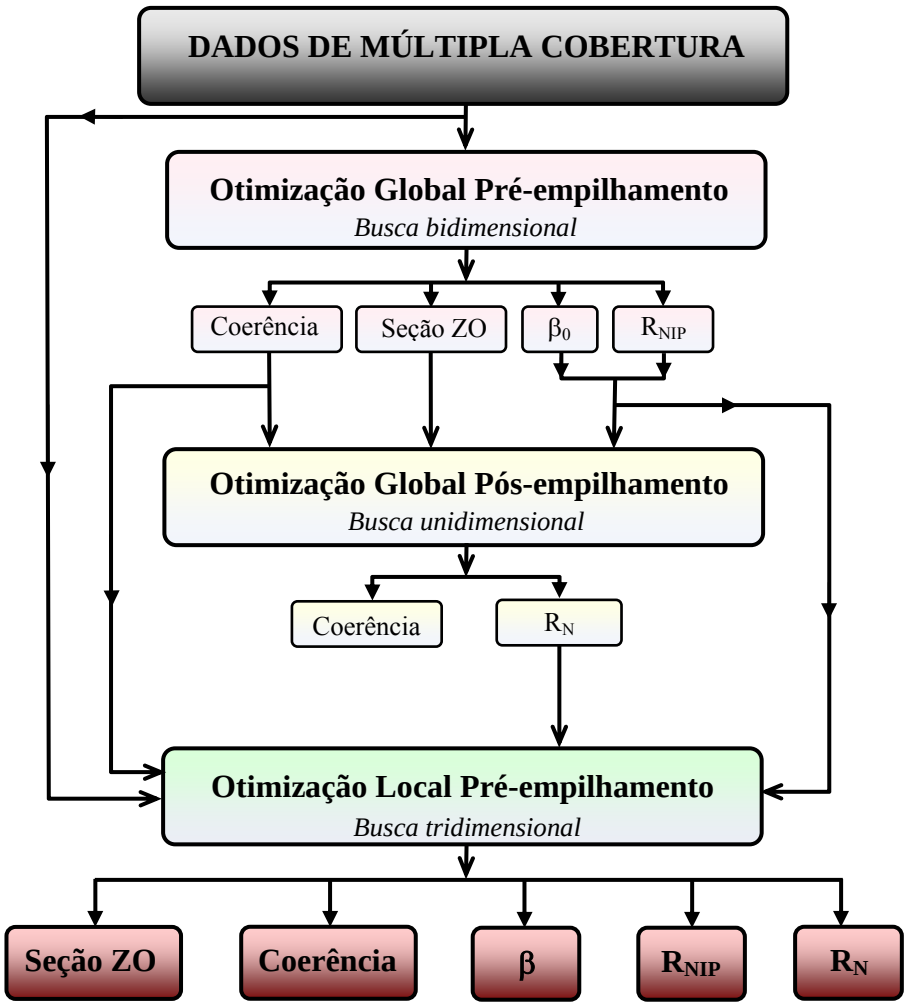
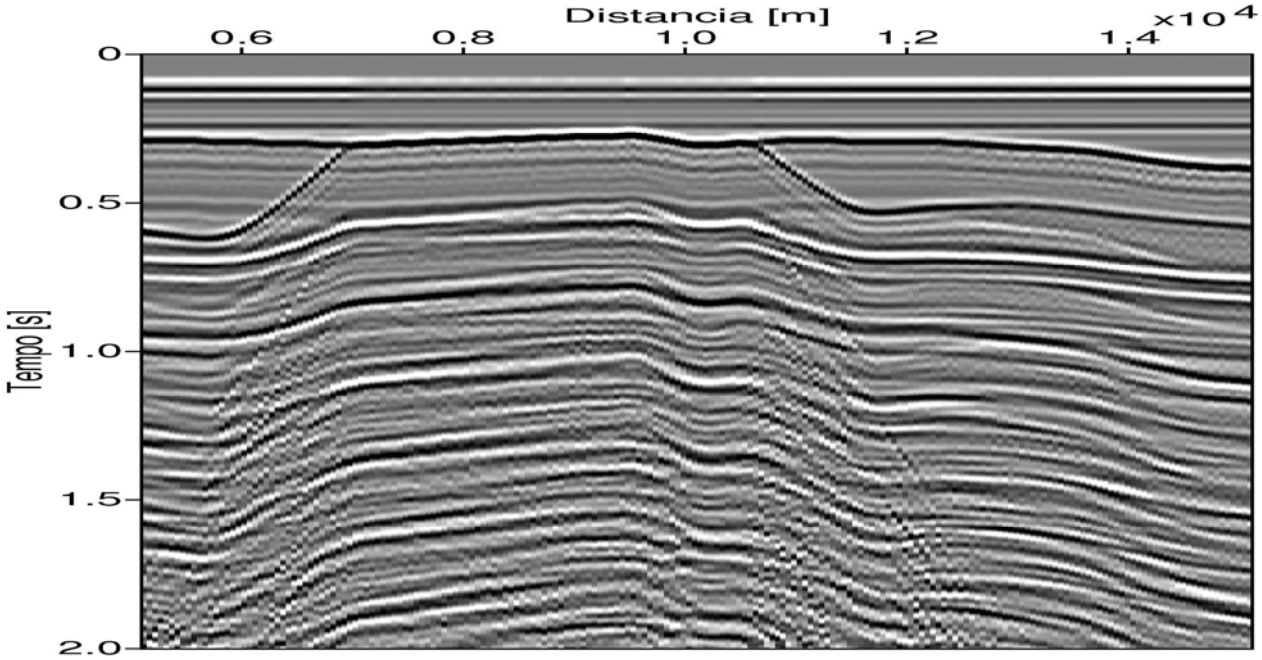


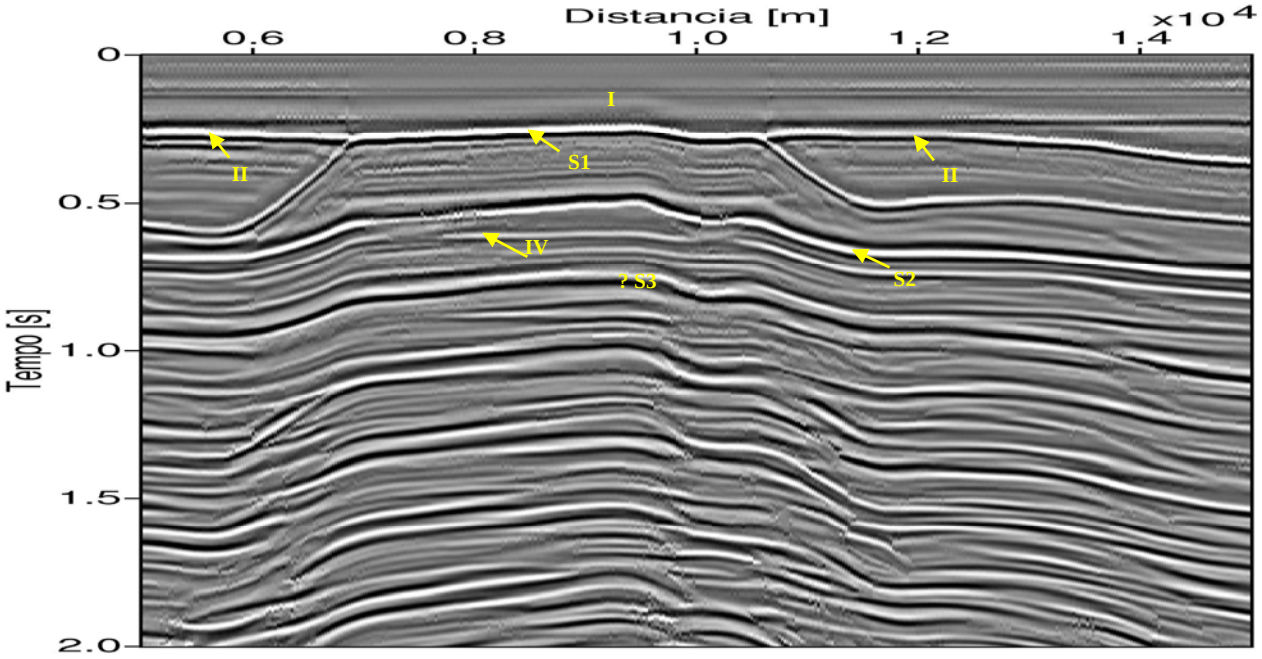
Figura 5-3: Fluxograma simplificado das etapas do processamento sísmico pela técnica CRS através da estratégia de busca global-local.
Fonte: Modificado de Garabito Callapino (2001).

Tabela 5-1: Principais parâmetros utilizados no processamento CRS Global-local.

PARÂMETROS		MODELOS	
		I	**II**
	Velocidade próxima à superfície	2000m/s	1750m/s
	Freqüência dominante	30Hz	
Coerência	**Tipo de medida de coerência**	*Semblance*.	
	Janela de tempo para a análise de coerência	0.050s	
	Incremento do número de amostras para a análise	2.	
	Coerência mínima associada aos tempos menores utilizado para a inclusão de um mínimo local	0.05s	
	Coerência máxima associada aos tempos menores utilizado para a inclusão de um mínimo local	0.5s	
Zona alvo	**CMP inicial**	600	
	CMP final	800	
	Incremento entre CMPs	1	
	Tempo mínimo	0s	
	Tempo máximo	3s	
Abertura do operador	**Afastamento mínimo**	300m	
	Afastamento máximo	3000m	
	Tempo mínimo	0s	
	Tempo máximo	2.8s	
	Metade da distância mínima na coordenada ponto médio	151m	
	Metade da distância máxima na coordena ponto médio	601m	
Otimização Global e Local	**Limite inferior do espaço de busca de β_0**	60°	
	Limite superior do espaço de busca de β_0	60°	
	Limite inferior do espaço de busca do R_{NIP}	1	
	Limite superior do espaço de busca do R_{NIP}	20000	
	Limite inferior do espaço de busca do R_N	40000	
	Limite superior do espaço de busca do R_N	40000	

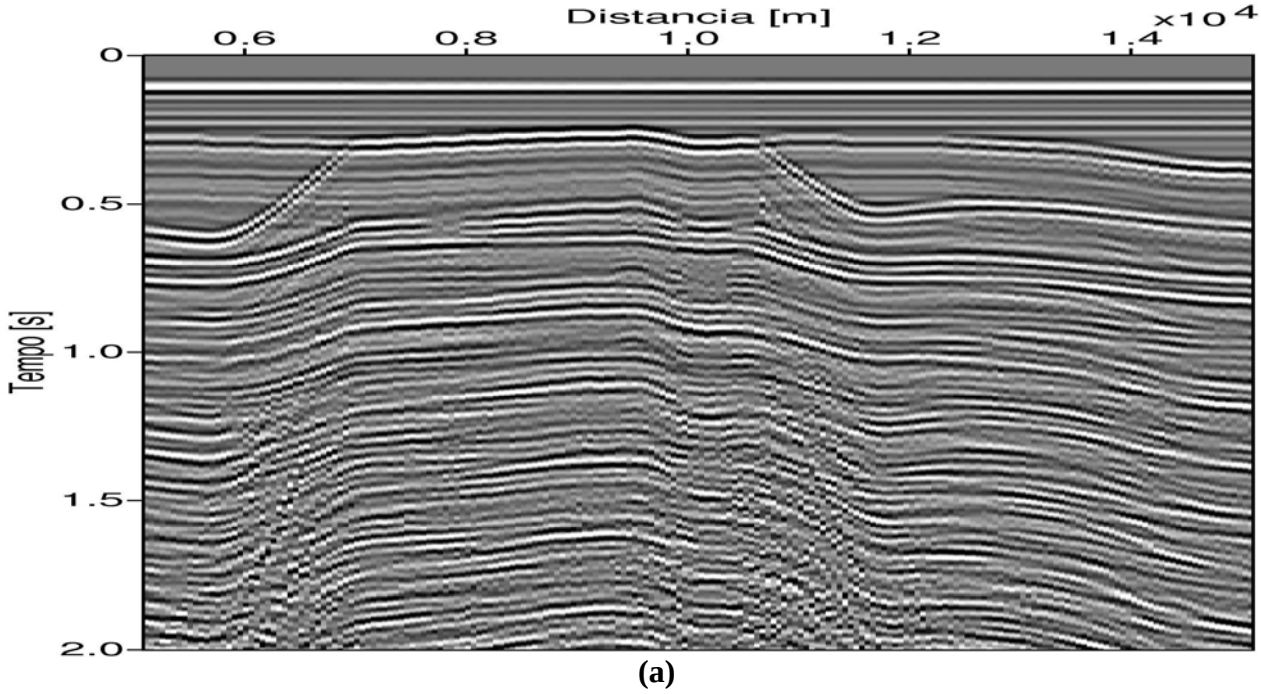


(a)

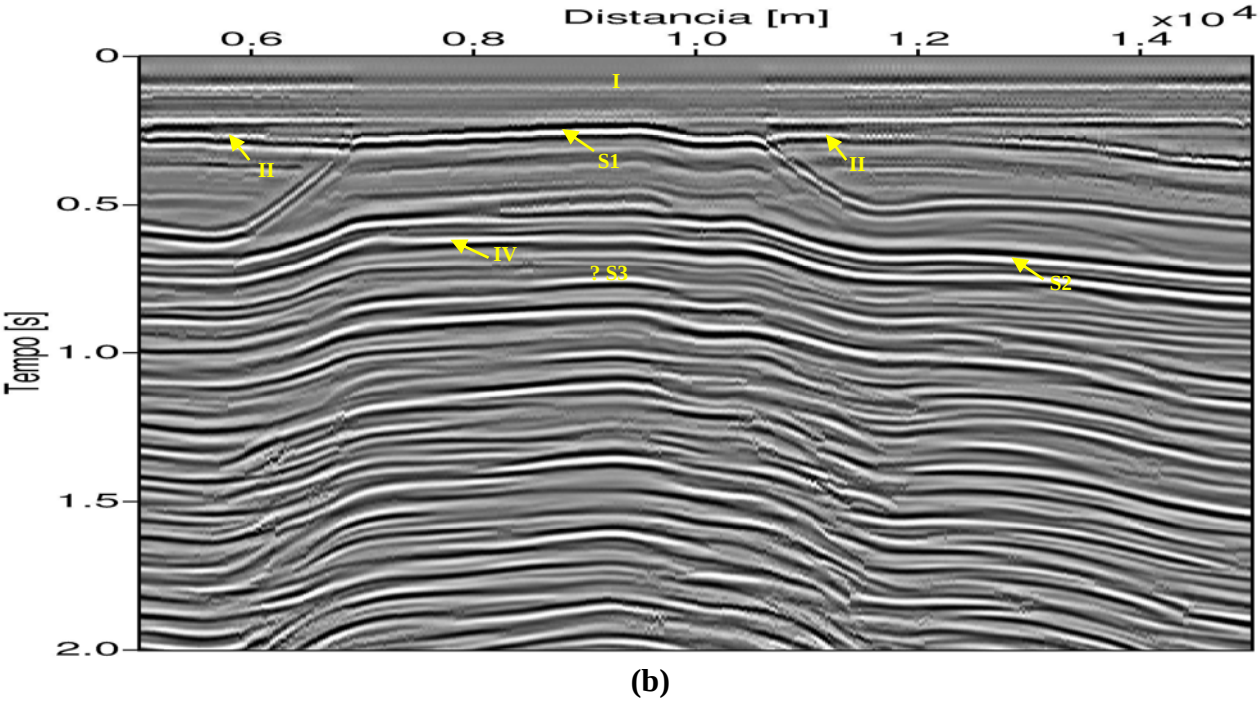


(b)

Figura 5-4: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.



(a)



(b)

Figura 5-5: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Amazonas. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

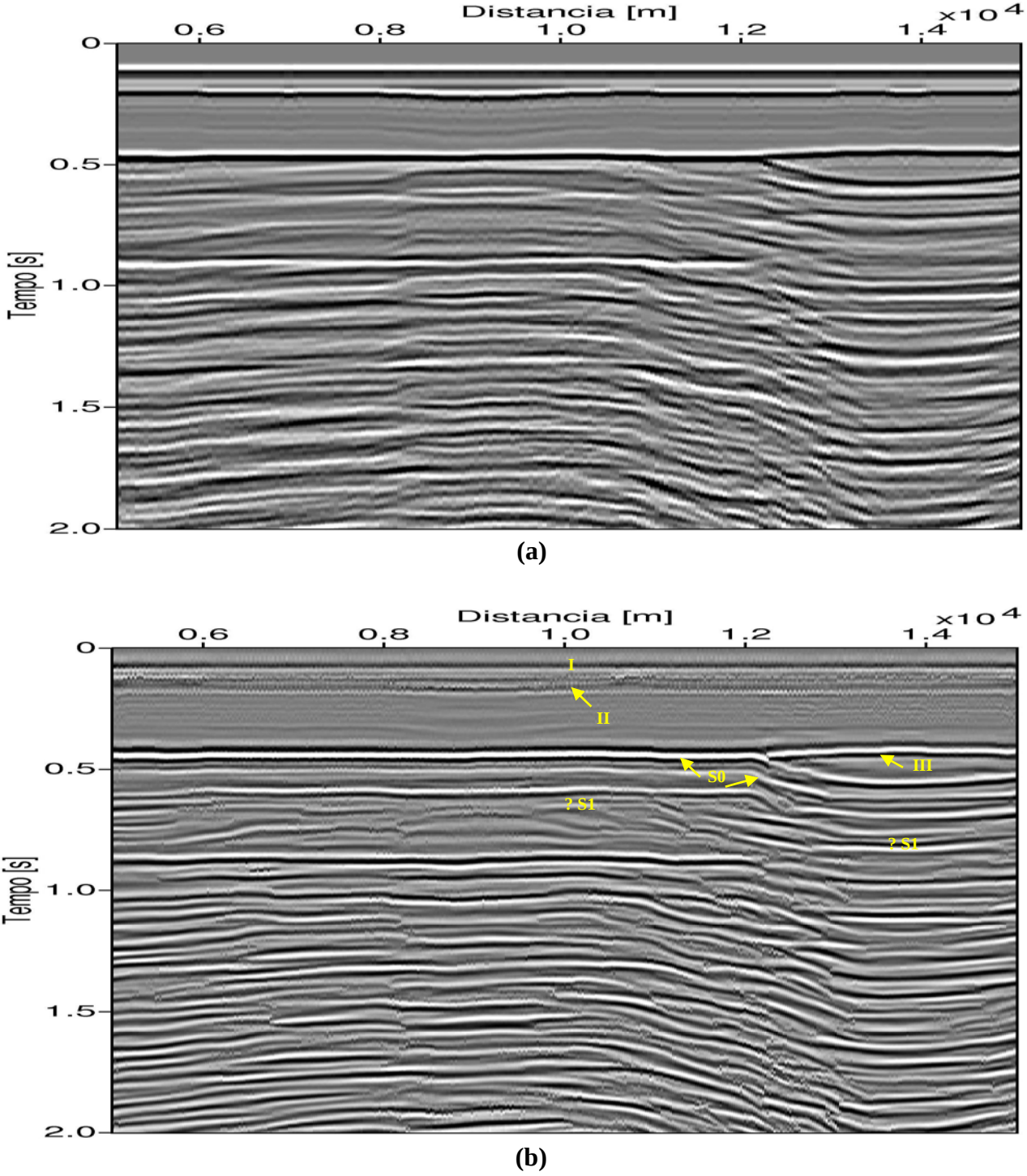


Figura 5-6: Seções sísmicas acústicas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

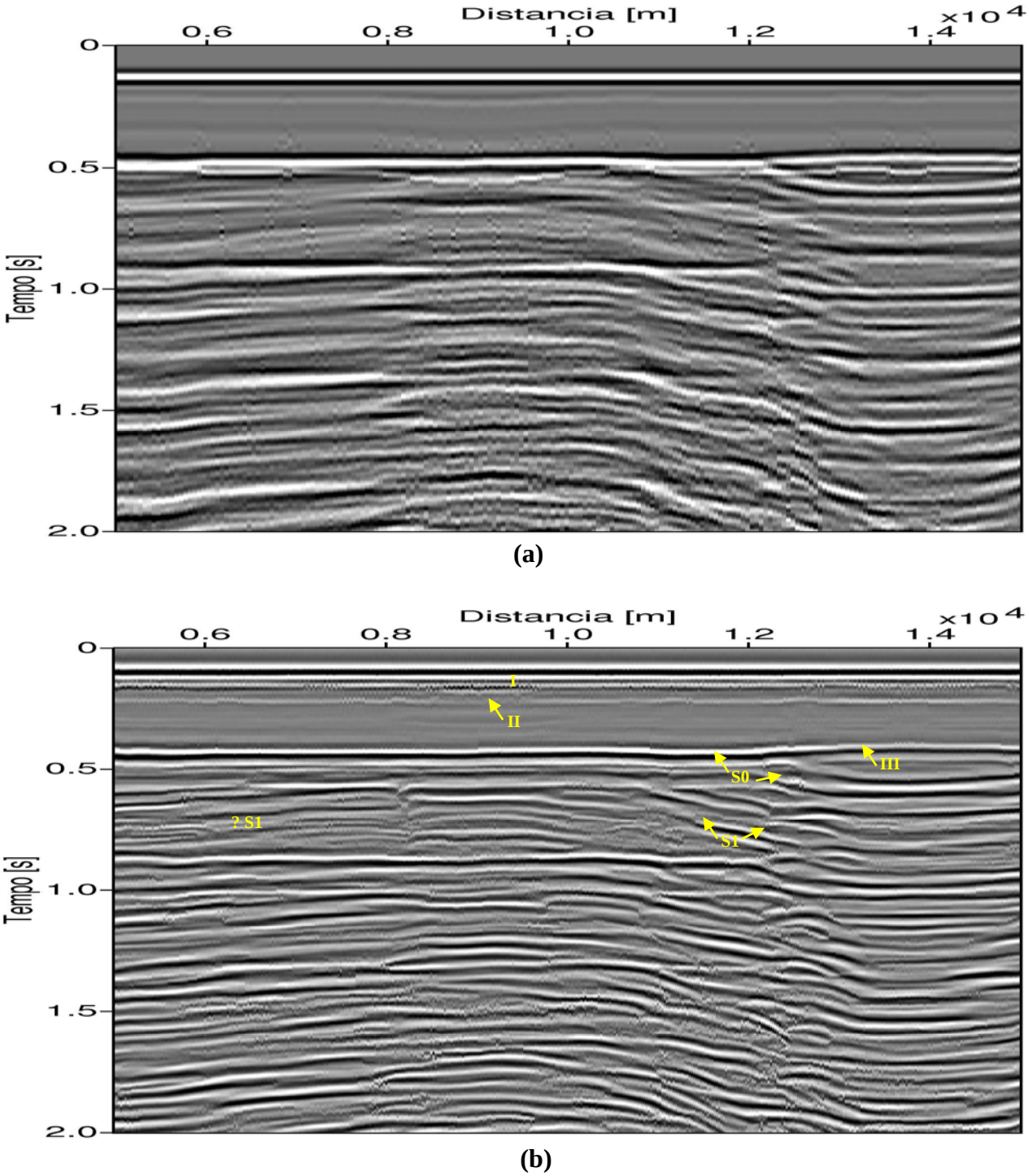


Figura 5-7: Seções sísmicas elásticas representativas da Bacia do Solimões. (a) Seção *offset* mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO processada pela técnica CRS. Em ambas as seções aplicou-se ganho AGC com janela de 1s.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de realizar uma análise simplificada do desempenho dos métodos de processamento CMP e CRS em dados acústicos e elásticos, neste trabalho, serão comparadas as seções acústicas e elásticas modeladas e processadas pelas técnicas CMP e CRS, referentes aos dados sísmicos obtidos pelos Modelos I e II representativos das bacias do Amazonas e do Solimões, respectivamente (Figuras 6-1, 6-2, 6-3 e 6-4).

Nas Figuras 6-1 e 6-2 são comparadas as seções modelada (a) e processadas pelas técnicas CMP (b) e CRS (c) referentes aos dados acústicos e elásticos, respectivamente, obtidos a partir do Modelo I representativo da Bacia do Amazonas.

Tanto na Figura 6-1 como na 6-2, comparando a seção ZO processada pela técnica CMP (b) com a seção afastamento mínimo (150m) modelada (a), observa-se que o método CMP promoveu uma maior suavização na definição dos refletores situados nos intervalos de 0,5s a 0,7s; já na comparação da seção ZO processada pela técnica CRS (c) com as demais, nota-se que esta além de apresentar maior razão sinal-ruído e uma menor suavização na definição dos refletores nos intervalos de 0,5s a 0,7s, conforme detalhe em amarelo. No detalhe em verde nas seções (a), (b) e (c) são observadas as reflexões múltiplas do topo da soleira S2 e da unidade IV, nota-se também que essas reflexões apresentam-se ressaltadas nas seções ZO processadas pela técnica CRS (c) enquanto que nas seções ZO processadas pela técnica CMP (b) esses eventos foram mais bem suprimidos, podendo esse fato ser atribuído à não automatização da análise de coerência no método CMP.

Já nas Figuras 6-3 e 6-4 são comparadas as seções modelada (a) e processadas pelas técnicas CMP (b) e CRS (c) referentes aos dados acústicos e elásticos, respectivamente, obtidos a partir do Modelo II representativos da Bacia do Solimões.

Tanto na Figura 6-3 como na 6-4, comparando as seções (a), (b) e (c) observa-se que a seção ZO processada pela técnica CRS (c) apresenta maior razão sinal-ruído e sutilmente uma melhor delimitação dos refletores situados nos intervalos de tempo entre 0,5s e 0,7s (caixa em amarelo), no entanto a menor ênfase das reflexões múltiplas (setas em verde) apresenta-se na seção ZO processada pela técnica CMP (b). O detalhe em amarelo nas seções (a), (b) e (c) mostradas na Figura 6-3 mostra que em todas as seções não é possível identificar com segurança a bifurcação da soleira S1, no entanto na Figura 6-4 nas seções (b) e (c) é possível fazer alguma

identificação.

Ressalta-se também que em ambas as figuras dos dados representativos das bacias do Amazonas e do Solimões, nos intervalos de tempo 0,7s a 2s, não é possível identificar os contatos entre as unidades, sendo identificadas somente reflexões múltiplas de contatos situados entre os instantes 0,5s a 0,7s que se apresentam sobrepostas às reflexões primárias.

Comparando os dados acústicos e elásticos apresentados tanto nas Figuras 6-1 e 6-2 como nas Figuras 6-3 e 6-4, constata-se que os dados elásticos processados apresentam outros eventos ocasionados possivelmente pelo registro não somente da onda P como dos seus modos convertidos; mas esses modos convertidos ainda são tidos como agentes complicadores uma vez que os métodos de processamento utilizados consideram o campo de onda como sendo composto somente por ondas P, tornando dessa maneira o processamento de dados elásticos um grande desafio.

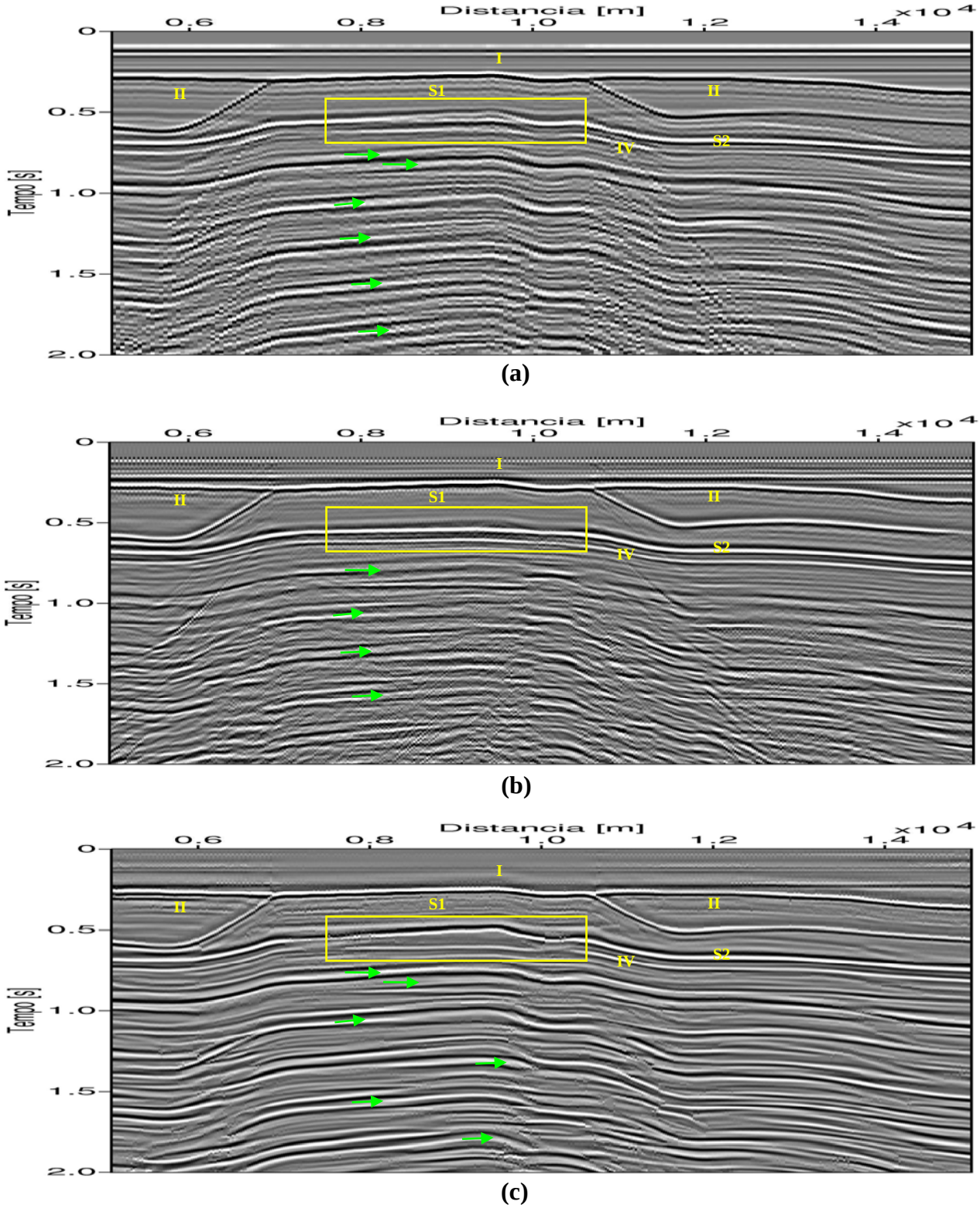


Figura 6-1: Seções acústicas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Seção afastamento mínimo (150 m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local.

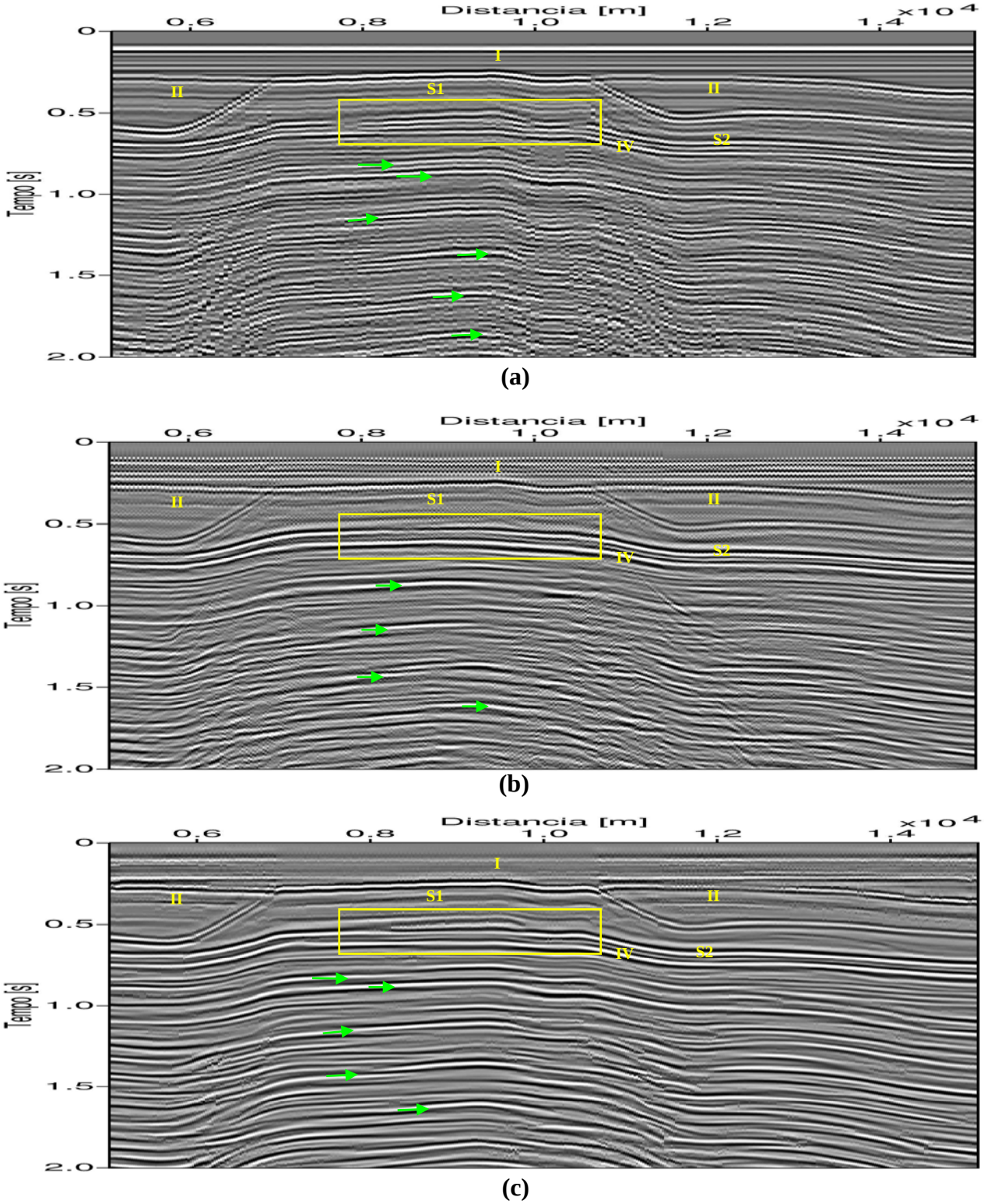


Figura 6-2: Seções elásticas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo I representativo da Bacia do Amazonas. (a) Seção afastamento mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local.

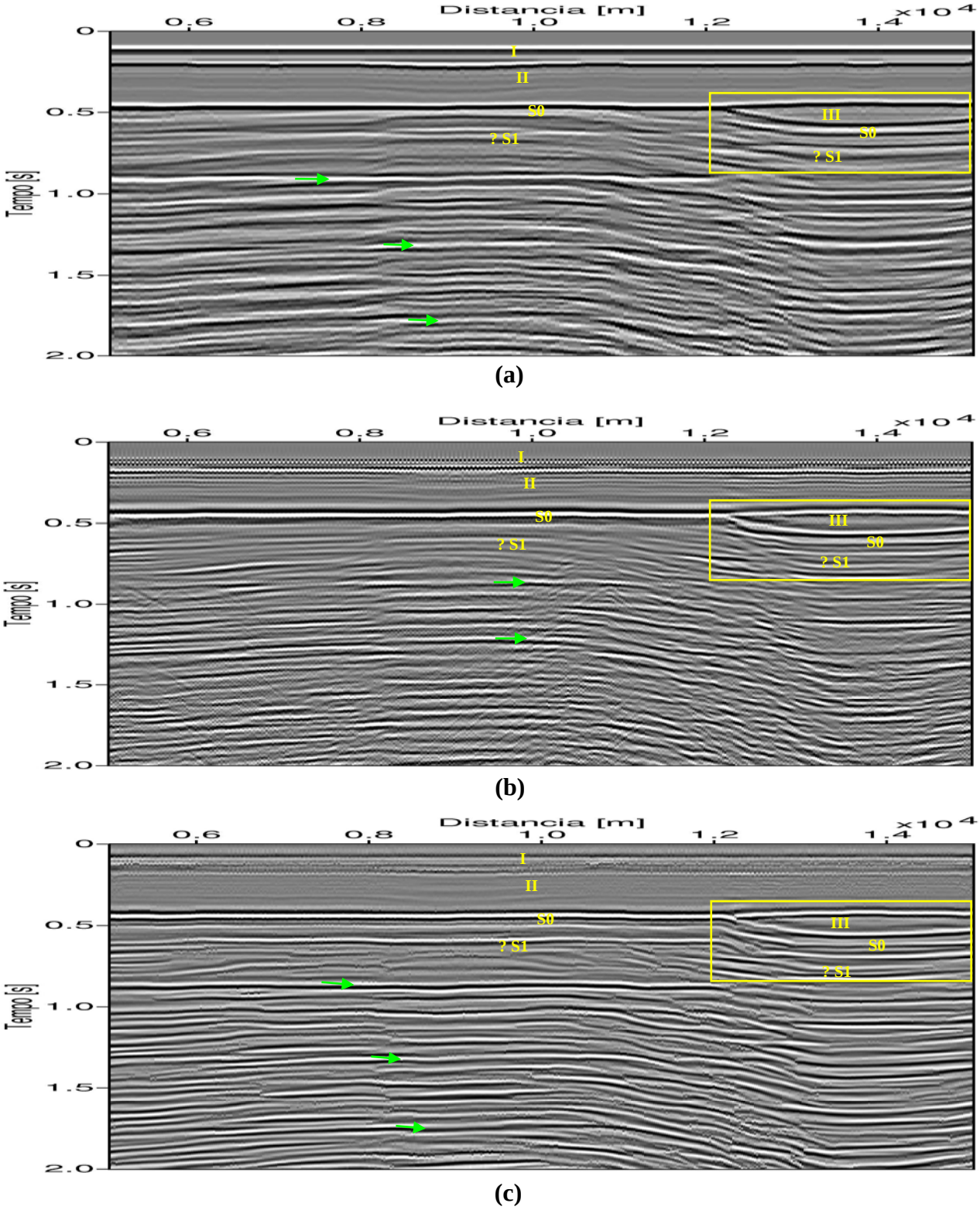
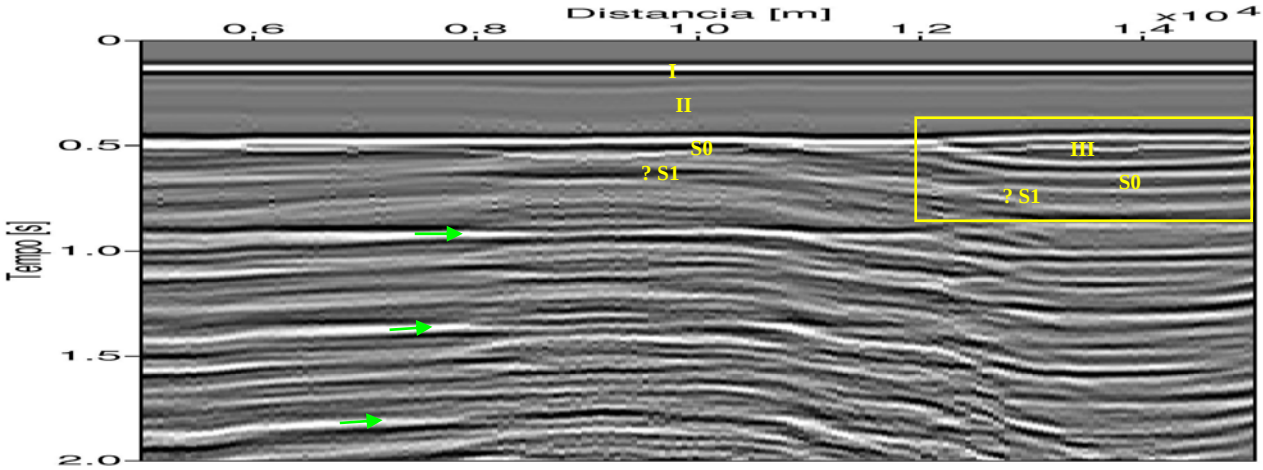
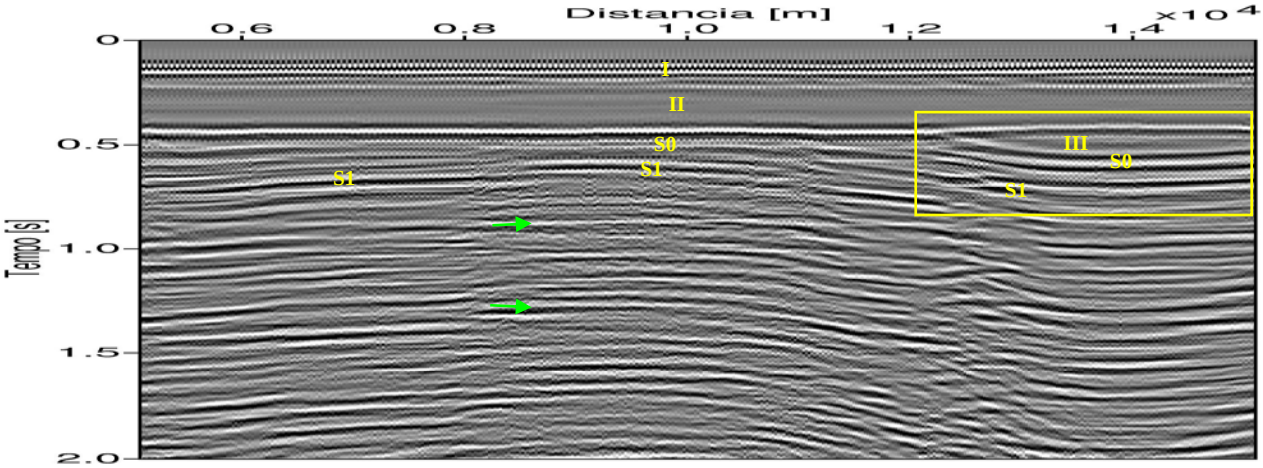


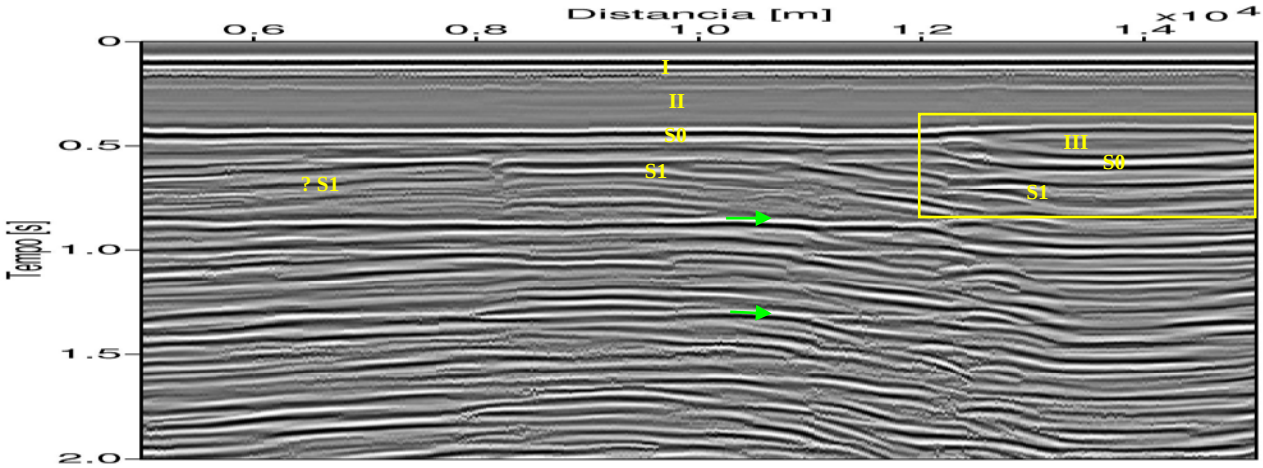
Figura 6-3: Seções acústicas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo II representativo da Bacia do Solimões. (a) Seção afastamento mínimo (150m) modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-4: Seções elásticas, modelada e processadas pelas técnicas de empilhamento CMP e CRS, obtidas a partir dos dados sísmicos do modelo II representativo da Bacia do Solimões. (a) Seção modelada; (b) Seção ZO CMP-2D; (c) Seção ZO CRS-2D Global-local.

6.1 MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO DOS DADOS PROCESSADOS

No processamento de dados sísmicos a etapa da migração sísmica tem como objetivo posicionar corretamente os refletores sísmicos em subsuperfície. Este processo busca corrigir os eventos das seções sísmicas, deslocando as reflexões primárias para suas verdadeiras posições espaciais e colapsando as difrações e com isso produzindo uma imagem sísmica que possibilite uma melhor interpretação dos dados sísmicos migrados (GRAY et al., 2001; MOREIRA NETO, 2004).

Este procedimento pode ser realizado tanto nos domínios do tempo como da profundidade, bem como, pré- ou pós-empilhamento. Neste trabalho, em virtude de se ter o modelo de velocidades optou-se pela migração pós-empilhamento e em profundidade.

Para realizar a migração pós-empilhamento em profundidade utilizou-se o método *split-step* (STOFFA et al., 1990). O método split-step é um método que está baseado na modificação da migração *phase-shift* (GAZDAG; SGUAZZERO, 1984) que admite a ocorrência de variações laterais de velocidade para cada intervalo da migração.

Para realizar a migração pelo método split-step utilizou-se o modelo de velocidades da onda p verdadeiro suavizado que posteriormente foi editado para as coordenadas das seções afastamento nulo ou zona alvo da migração (Figuras 6-5 e 6-6) e em seguida foi utilizado para migrar as seções acústicas e elásticas afastamento nulo simuladas, obtidas e descritas nos capítulos anteriores. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6-7, 6-8, 6-9 e 6-10. O script utilizado para a realização desta migração encontra-se listado no Apêndice A.

Nas Figuras 6-7 e 6-8 são apresentadas as seções migradas afastamento nulo acústica (b) e elástica (c) CMP e CRS referentes aos dados sísmicos obtidos a partir do modelo I representativo da Bacia do Amazonas, respectivamente.

Observa-se que nas Figuras 6-7 e 6-8, tanto na seção (b) como na (c), os contatos entre as unidades I e II, I e a soleira S1, II e a soleira S2, o topo da soleira S2 e o topo da unidade IV encontram-se bem definidos e aproximadamente coincidentes com os contatos existentes nas profundidades de 0m a 1.200m do modelo de velocidade que serviu como objeto de comparação; a partir da profundidade de 1.200m a 4.000m não é possível identificar reflexões confiáveis que se possa afirmar como sendo um contato entre unidades; quanto à ocorrência de reflexões múltiplas, observa-se que nas seções (b) e (c) da Figura 6-8 essas reflexões encontram mais

ressaltas a partir da profundidade de 1.800m.

Nas Figuras 6-9 e 6-10 são apresentadas as seções migradas afastamento nulo acústica (b) e elástica (c) CMP e CRS referentes aos dados sísmicos obtidos a partir do modelo II representativo da Bacia do Solimões, respectivamente.

Observa-se que na Figura 6-9, tanto na seção (b) como na (c), os contatos entre as unidades I e II, II e III, II e a soleira S0, III e a soleira S0 encontram-se bem definidos e aproximadamente coincidentes com os contatos existentes nas profundidades de 0m a 1.200m do modelo de velocidade utilizado, como objeto de comparação; as soleiras S0 e S1 são identificadas na seção (b), porém na seção (c) a identificação da soleira S1 é incerta uma vez que não apresenta uma boa continuidade lateral; já na Figura 6-10, os contatos entre as unidades encontram-se igualmente dispostos como na Figura 6-9, exceto a disposição da soleira S1 que na seção (b) não é possível de ser identificada devido a ocorrência de uma possível reflexão múltipla que se apresenta sobreposta à essa reflexão primária na profundidade de 1.000m. Quanto à ocorrência de reflexões múltiplas, observa-se que nas seções (b) e (c) da Figura 6-9 são difíceis de serem identificadas, diferentemente ao que ocorre em ambas as seções da Figura 6-10, onde são identificadas múltiplas a partir de 1.000m de profundidade na seção (b) e a partir de 1.800m de profundidade na seção (c).

Ressalta-se que a presença de reflexões múltiplas quando não suprimidas antes do processo de migração é tida como um agente complicador, contudo, os resultados obtidos nesse estudo são avaliados como satisfatórios, pelo menos nas profundidades rasas (até 1.200 m) dos modelos estudados.

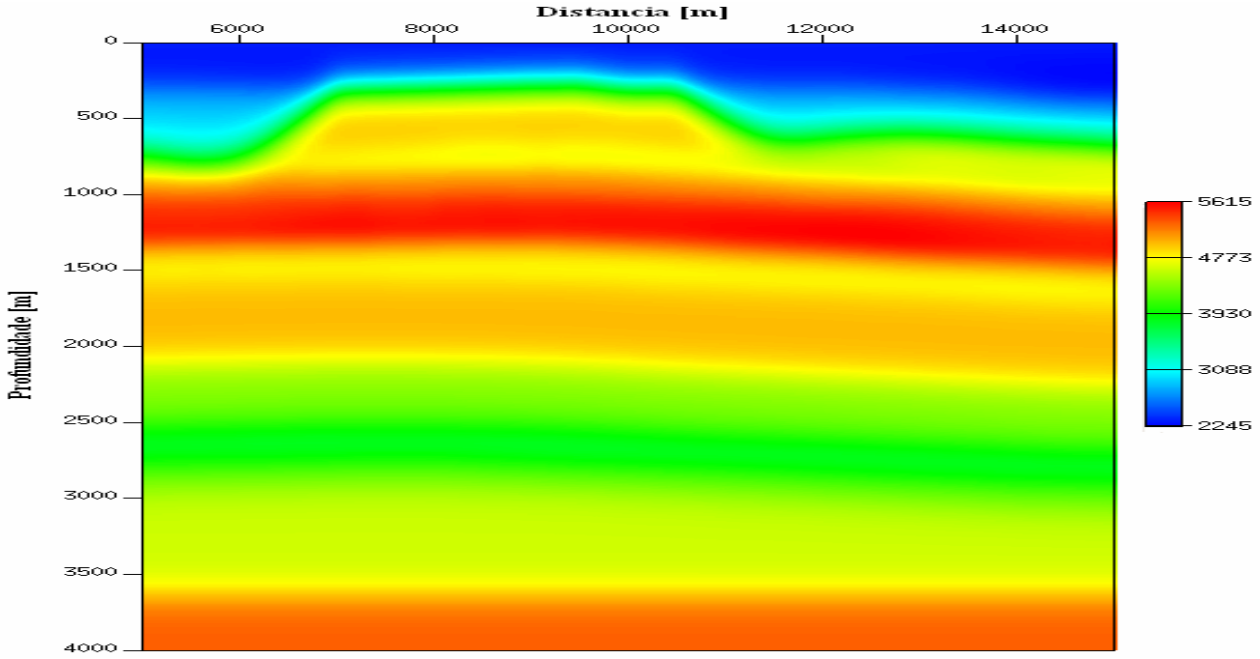


Figura 6-5: Modelo de velocidades da onda P suavizado referente ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas.

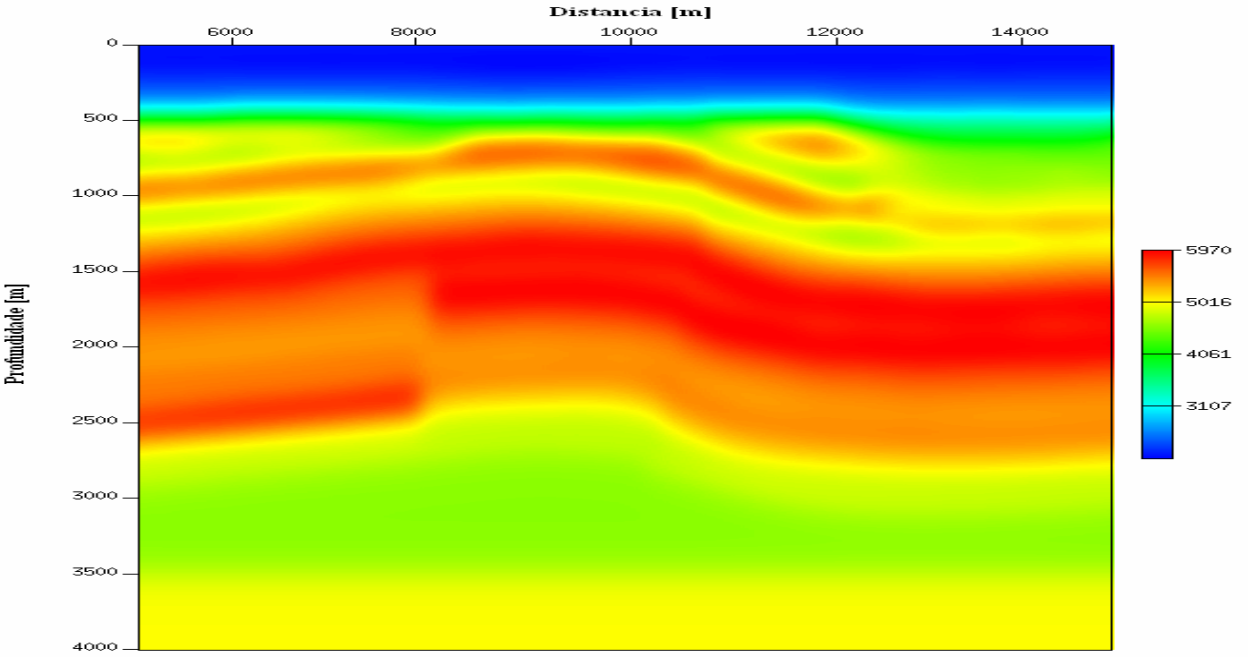


Figura 6-6: Modelo de velocidades da onda P suavizado referente ao modelo II representativo da Bacia do Solimões.

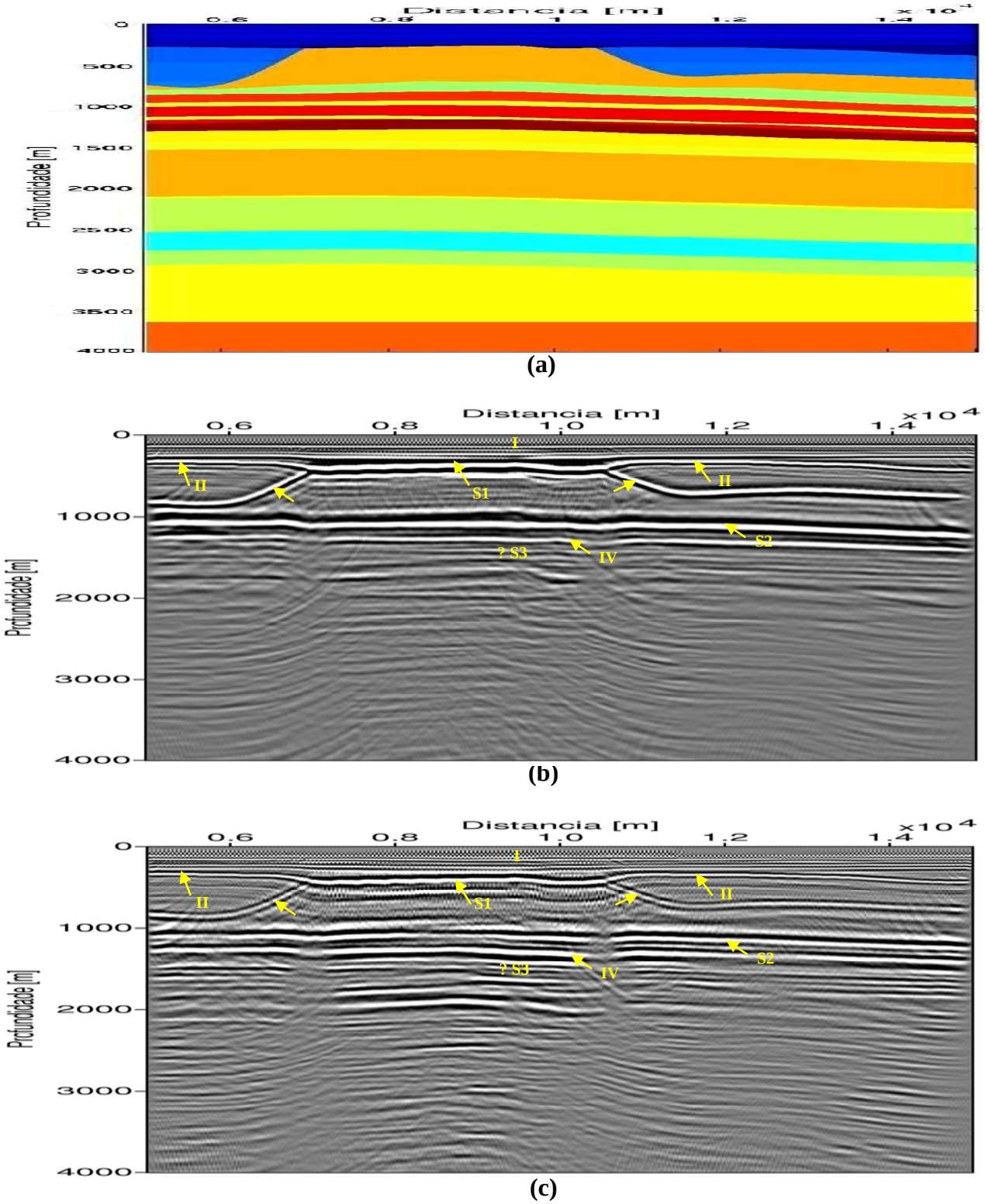


Figura 6-7: Seções ZO, referentes ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas, processadas pela técnica CMP-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método *split-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica.

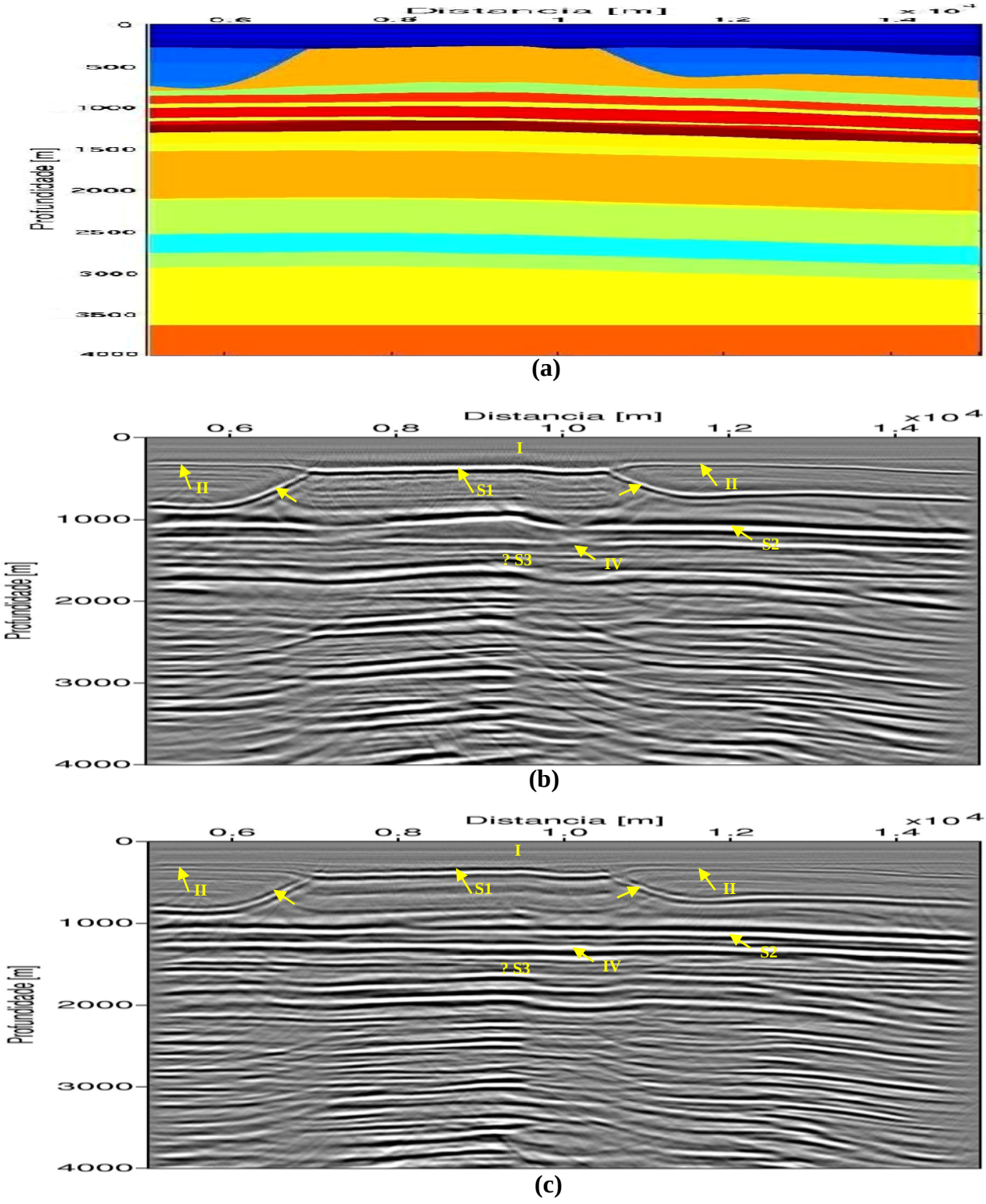


Figura 6-8: Seções ZO, referentes ao modelo I representativo da Bacia do Amazonas, processadas pela técnica CRS-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método *split-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica.

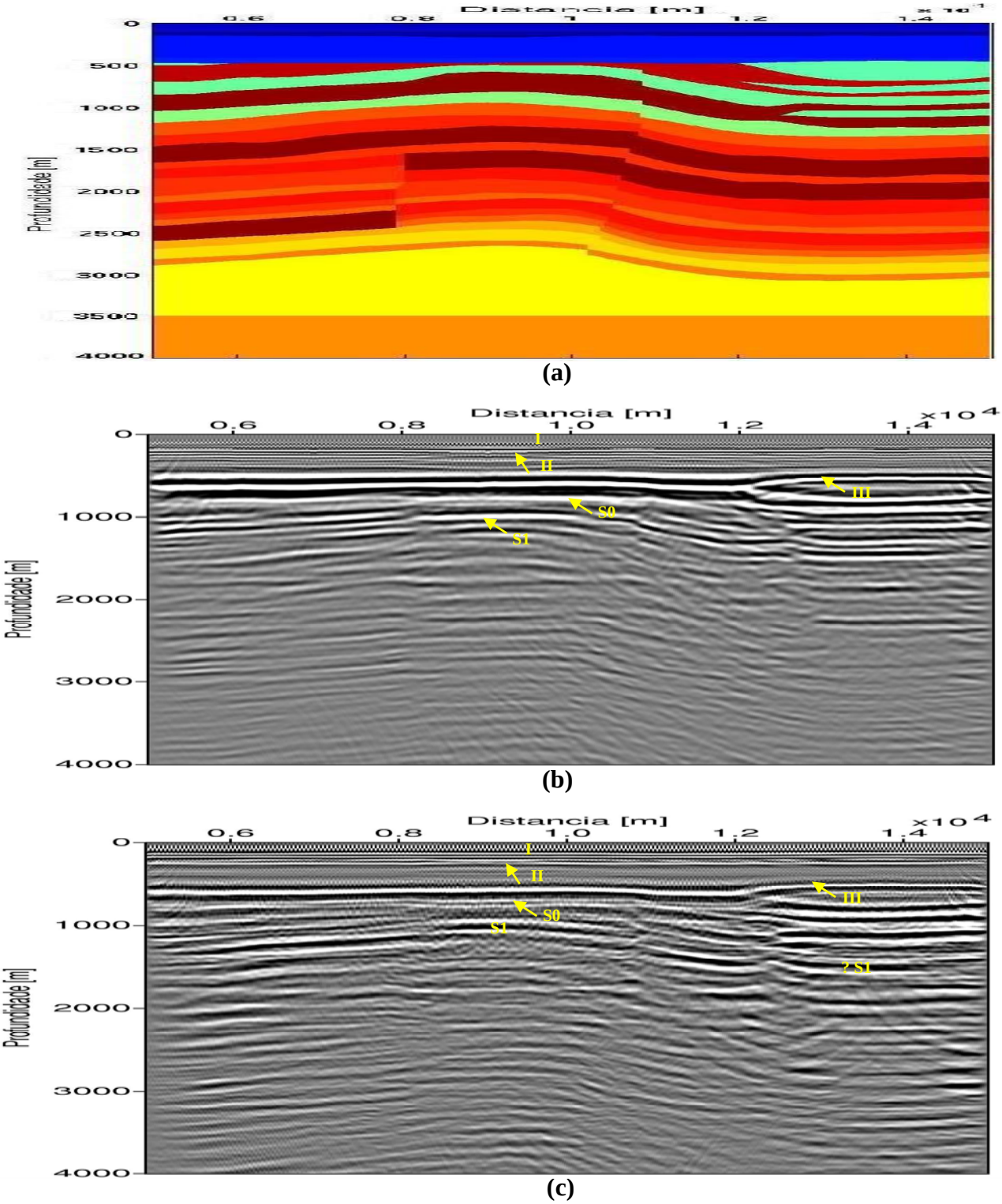


Figura 6-9: Seções ZO, referentes ao modelo II representativo da Bacia do Solimões, processadas pela técnica CMP-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método *split-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica.

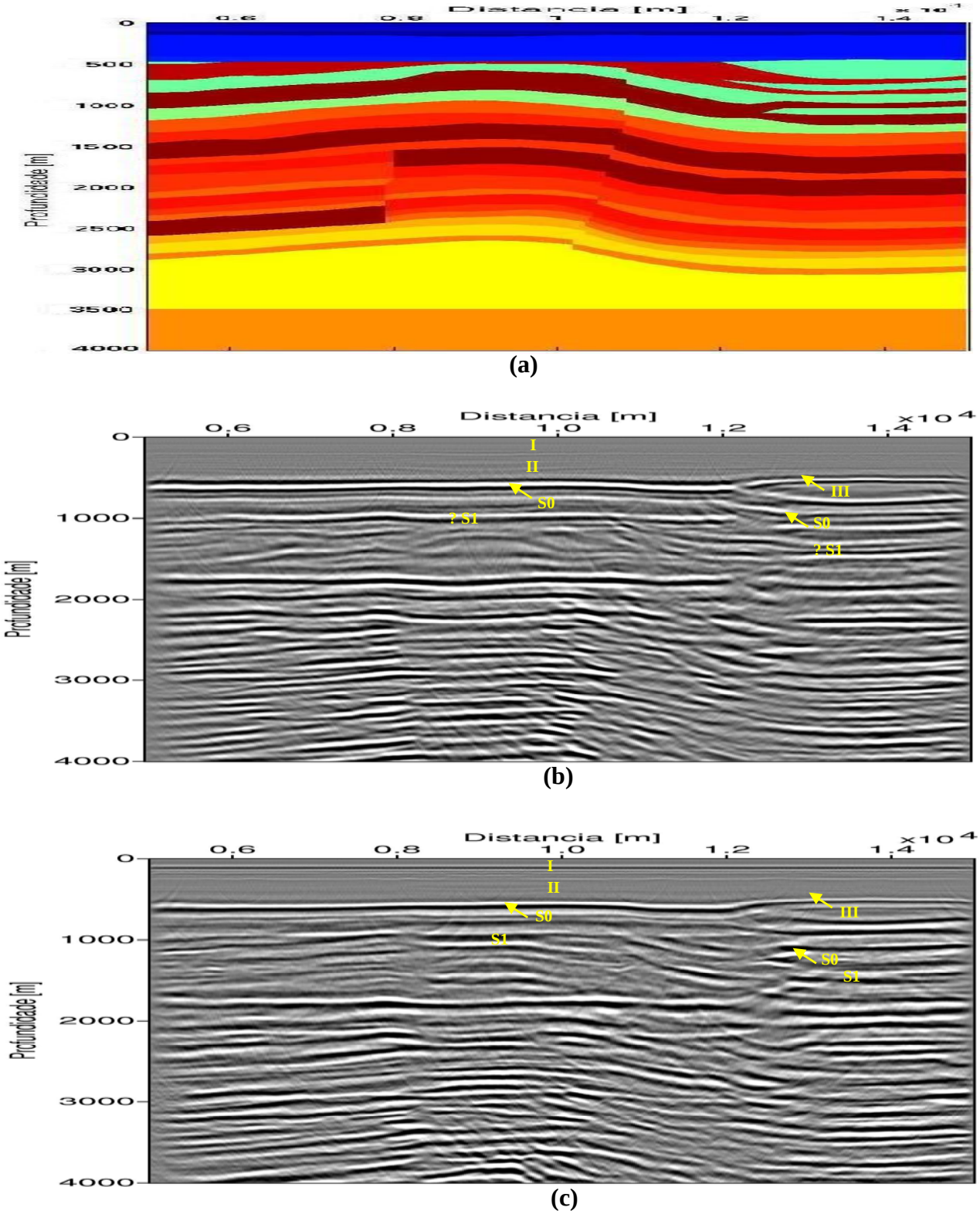


Figura 6-10: Seções ZO, referentes ao modelo II representativo da Bacia do Solimões, processadas pela técnica CRS-2D e migrada em profundidade pós-empilhamento pelo método *split-step*. (a) Modelo de velocidades da onda P. (b) Seção acústica. (c) Seção elástica.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conseguiu-se construir modelos de velocidades e de densidade bastante representativos quanto às complexidades geológicas existentes nas bacias do Amazonas e do Solimões. Os dados acústicos e elásticos gerados a partir desses modelos além de retratarem as problemáticas existentes nessas bacias são também bastante semelhantes às seções sísmicas reais quanto ao grau de complexidade tornando-os, desse modo, um grande desafio para o processamento sísmico. Em decorrência disto, estes dados serão disponibilizados para futuros estudos dos problemas de imageamento sísmico das bacias estudadas aplicando outras técnicas.

O resultado da aplicação do método CRS nos dados sintéticos acústicos e elásticos representativos tanto da Bacia do Amazonas como da Bacia do Solimões, em geral, exibe uma razão sinal/ruído superior e melhor continuidade lateral dos refletores, em relação aos resultados obtidos no processamento realizado através do método CMP. No entanto, sabe-se também que o método CRS por ressaltar as reflexões primárias promove prejuízo às difrações prejudicando assim a etapa de migração.

Os resultados obtidos na migração pós-empilhamento em profundidade através do método *split-step* mostraram que, mesmo com a presença de reflexões múltiplas e com a limitação dos métodos de processamento em considerar somente o campo de onda P nos dados, são satisfatórios, tendo sido levado em consideração a continuidade lateral dos refletores.

Em geral, os resultados obtidos apresentam uma boa resolução nos eventos situados na porção superior do modelo (em tempo, até 0,7s e em profundidade até 1.200m), porém os eventos situados em porções inferiores (onde se encontra a rocha reservatório) não foram imageados satisfatoriamente com as técnicas utilizadas.

Recomenda-se que a partir dos dados sintéticos gerados neste trabalho sejam realizados estudos que objetivem a aplicação de outras técnicas de imageamento que visem uma melhor iluminação das áreas situadas abaixo das soleiras.

Com relação às reflexões múltiplas observa-se que, tanto nas seções modeladas quanto processadas, há ocorrência de reflexões múltiplas com fortes amplitudes em virtude dos modelos de velocidades utilizados apresentarem camadas com velocidades constantes e contrastes de velocidades abruptos entre elas; neste sentido, recomenda-se que em estudos posteriores sejam gerados dados cujos modelos de velocidades utilizados representem melhor as variações de

velocidades dentro e entre as camadas; além disso, recomenda-se também que sejam aplicados métodos de supressão de múltiplas nos dados pré-empilhados.

REFERÊNCIAS

AL-SADI, H. N. **Seismic exploration, technique and processing**. Boston: Basel, 1982. 215p.

ALFORD, R. M.; KELLY, K, R.; BOORE, M. D. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. **Geophysics**, v.39, n. 6, p.834-852, dez.1974.

ALVES, D. B. et al. ICP-MS Melhora a correlação estratigráfica das soleiras de diabásio da Bacia do Solimões. In: RIO OIL; GÁS EXPO AND CONFERENCE. 2000. Rio de Janeiro. **Resumo expandido**. Rio Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP), 2000.

BENDER, A. A. et al. Quantificação 3D da evolução termal da Bacia do Solimões e suas implicações petrolíferas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7.; WORKSHOP DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL DA AMAZÔNIA, 3., 2001, Belém. **Verticalização mineral na Amazônia**: resumos expandidos. Belém: SBG - Núcleo Norte, 2001. 1 CD-ROM.

COHEN, J. K.; STOCKWELL JR., J. W. CWP/SU: seismic unix release 34: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines. 2000. Disponível em: <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/>. Acesso em: 26 de Junho de 2006.

CARCIONE, J. M.; HERMAN, G. C.; KROODE, A. P. Y2K review article - seismic modeling. 2002. **Geophysics,** v. 67, n. 4, p.1304-1325, jul.-ago. 2002.

CORDANI, U. G. et al. Estudo preliminar do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. **Ciência Técnica Petróleo**. Rio de Janeiro: Petrobras, n. 15, p. 10-70, 1984.

CUNHA, P. R. C. et al. Bacia do Amazonas. Estratigrafia das Bacias sedimentares do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.8, n.1, p. 47-55, jan.-mar. 1994.

DAMASCENO, B. C. Gipsita do Rio Cupari, região Centro-Oeste do Estado do Pará. In: BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Informe de Recursos Minerais**: Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto. Belém: CPRM, 2000. n. 9, v.1, 26p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/opor/pdf/gipsita.pdf> Acesso em: 15 de Fevereiro de 2006.

DUARTE, O. O. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS. 1997. 401p.

EIRAS, J. F. Geologia e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6., 1999, Manaus. **Boletim de resumos expandidos**. Manaus: SBG – Núcleo Norte, 1999. p. 30-32.

EIRAS, J. F. Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. In: TAHA, M. **Searching for oil and gas in the land of giants**: the search magazine. Edição Especial sobre o Brasil. Argentina: Schlumberger, 1998. p.23-31. Disponível: <http://acd.ufrj.br/multimin/mmp/textos/cap2p/index.htm>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2006.

EIRAS, J. F.; MATSUDA, N. S. **Roteiro geológico do paleozóico do rio Tapajós, borda Sul da Bacia do Amazonas. Pará**. Belém. Petrobras/E&P AM. 1995. (Relatório Interno).

EIRAS, J. F.; WANDERLEY FILHO, J.R. Ocorrências de petróleo relacionadas a rochas magmáticas fanerozóicas. In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 2., 2002, Belém. **Boletim de resumos e roteiro de excursão**. Belém: Núcleo PRONEX do Centro de Geociências da UFPA, 2002. p.54.

EIRAS, J. F. et al. Bacia do Solimões. Estratigrafia das bacias sedimentares do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 17-45, jan.-mar. 1994.

GARABITO CALLAPINO , G. **Empilhamento sísmico por superfície de reflexão comum**: um novo algoritmo usando otimização global e local. 2001. 65f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2001.

GARABITO CALLAPINO, G. et al. Application of the CRS stack to seismic data of Amazon paleozoic basin. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Expanded abstracts**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 1 CD-ROM.

GARABITO CALLAPINO, G. et al. Common reflection surface stack: a new parameter search strategy by global optimization. In: ANNUAL SEG MEETING, 71., 2001, San Antonio . **Expanded abstracts**. San Antonio (Texas, USA): SEG. 2001a. p. 2009-2012.

GAZDAG, J.; SGUAZZERO, P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. **Geophysics**, v.49, n. 2, p.124-131, fev. 1984.

GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M.H. **Practical optimization**. New York, USA: Academic Press, Inc., 1981. 401p.

GONZAGA, F. G.; GONÇALVES, F. T. T.; COUTINHO, L. F. C. Petroleum geology of the Amazonas Basin, Brazil: modeling of hydrocarbon generation and migration. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Eds.). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. AAPG Memoir 73, 2000. p.159-178.

GRAY, S. H. et al. Seismic migration problems and solutions. **Geophysics**, v. 66, n. 5, p.1622-1640, 2001.

HOLBERG, O. Computacional 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, 1987.

HOUSE, L. et al. Elastic modeling Initiative, Part I: objectives. In: ANNUAL SEG MEETING, 68., 1998, New Orleans (Lousiana, USA). **Expanded abstracts**, New Orleans (Lousiana, USA): SEG, 1998. p. 1440-1443. Disponível em: <http://www.ees4.lanl.gov/image-seg/publicat.html> Acesso em : 22 de Março de 2007.

HOUSE, L.; LARSEN, S.; BEDNAR, J. 3-D elastic numerical modeling of a complex salt structure. In: ANNUAL SEG MEETING, 70., 2000, Calgary (Canadá). **Expanded abstracts**, Calgary (Canadá): SEG, 2000. p. 2201-2204.

HÖCHT, G. et al. Seismics and optics: hyperbolae and curvatures. **Journal of Applied Geophysics**, v. 42, n. 3 e 4, p. 261-281, 1999.

IKELLE, L. T.; AMUNDSEN, L. **Introduction to petroleum seismology**. Investigations in Geophysics nº. 12. Tulsa (Oklahoma, USA): Society of Exploration Geophysicists - SEG, 2005. 677p.

ISSLER, R. S. et al. Geologia da Folha SA.22 Belém. In: BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Projeto RADAM. **Folha SA.22 Belém**. Rio de Janeiro: DNPM, 1974, v.5, p.1-60.

JÄGER, R. et al. Common reflection surface stack: image and atrributes. **Geophysics**, v. 66, n. 1, p. 97-109, jan.-fev. 2001.

KARRENBACH, M. **Elastic tensor wave field**. 1995. Thesis (PhD) - Stanford University, Dept. of Geophysics, 1995. Disponível em: <http://sepwww.stanford.edu/research/reports/theses.html> Acesso em: 22 de Março de 2007.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, may, 1983.

LARSEN, S.; GRIEGER, J. Elastic modeling Initiative, Part III: 3-D computational modeling. In: ANNUAL SEG MEETING, 68., 1998, New Orleans (Lousiana, USA). **Expanded abstracts**. New Orleans (Lousiana, USA): SEG, 1998. p.1803-1806. Disponível em: <http://www.ees4.lanl.gov/image-seg/publicat.html> Acesso em: 22 de Março de 2007.

LEVANDER, A. R. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. **Geophysics**, v. 53, n. 11, p. 1425-1436, nov. 1988.

LIMA, C. C. A. **Um novo algoritmo para a implementação do método de empilhamento SRC 3D e modelagem sísmica da Bacia do Amazonas**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2006.

LIMA, C. C. A.; GARABITO CALLAPINO, G.; EIRAS, J. F. Modelagem sísmica por diferenças finitas – o exemplo da Bacia do Solimões. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Expanded abstracts**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 1 CD-ROM.

LOG interpretation charts. Houston-Texas: Schlumberger. 1986. p.114-115.

MANN, J. Common-reflection-surface stack: user's manual to version 4.2. Geophysical Institute, University of Karlsruhe, 2001. 23p. (Manual)

MANN, J. **Extensions and applications of the common reflection surface stack method**. 2002. 165f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade de Karlsruhe, Alemanha, 2002.

MARTIN, G. S. **The marmousi2 model, elastic synthetic data, and na analysis of imaging and AVO in a structurally complex environment**. 2004. 211f. Dissertation (Master) - University of Houston, 2004. Disponível em: <http://www.agl.uh.edu/downloads/downloads.htm> Acesso em: 26 de Março de 2007.

MODELAGEM sísmica e visualização 3-D de bacias sedimentares em alvos exploratórios. FINEP/CNPq/CTPETRO/ PETROBRAS, 2003. (Projeto).

MOREIRA NETO, C. A. **Migração pré-empilhamento em profundidade utilizando ondas planas**. 2004. 110f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. Salvador. 2004.

MÜLLER, T. Common reflection surface Stack versus NMO/Stack and NMO/DMO/Stack. In: ANNUAL INTERNAT. MTG., EUR. ASSN. GEOSCI. ENG., 60., 1998, Leipzig (Sachsen, Germany). **Extended abstracts**. Leipzig (Sachsen, Germany): EAEG, 1998. p. 1–20.

NAZARÉ, C. P. P. et al. Aplicação dos métodos PMC e SRC em dados sísmicos sintéticos de um modelo representativo da Bacia do Solimões, Região Amazônica, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Expanded abstracts**. Salvador: SBGf, 2005. 1 CD-ROM.

NEVES, C. A. O.; RODRIGUES, R. **Integração geológica e exploratória da Bacia do Amazonas**: relatório interno. Manaus: PETROBRAS/DENOC, 1989. (Relatório)

PASCHOAL JR., G. J. W. **Estudo do método de empilhamento SRC e aplicação em dados sintéticos e reais**. 2004. 103f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2004.

QIN, F. et al. Application of elastic modeling to subsalt interpretation. In: ANNUAL SEG MEETING, 67., 1997, Dallas (USA). **Expanded abstracts**. Dallas (USA): SEG, 1997, p. 1092-1095.

SILVA NETO, F. A. **Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos 2-D e 2,5-D**. 2004. 93f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 2004.

SILVA NETO, F. A. de. et al. Modelagem acústica e elástica para a Bacia do Solimões. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Expanded abstracts**. Salvador: SBGf, 2005. 1 CD-ROM.

SOBREIRA, J. F. F. et al. Modelagem sísmica elástica como estudo de viabilidade técnica e planejamento para aquisição sísmica multicomponente: um exemplo para a Bacia do Solimões. In: SIMPÓSIO DE GEOFÍSICA DA PETROBRAS - SIMGEF, 9., 2004, Aracaju. **Boletim de resumos**. Aracaju: PETROBRAS, 2004, p.33.

STOFFA, P. L. et al. Split-step Fourier migration. **Geophysics**, v.55, n. 3, p.410-421, abr. 1990.

VIRIEUX, J. P-SV wave propagation in hetergeneous media: velocity-stress finite-difference method. **Geophysics**, v. 51, n. 4, p. 889-901, april 1986.

WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S.; ALVES, D. B. O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas - herói ou vilão? **Boletim Geociências da Petrobras**, v.14, n.1, p.177-184, nov./2005-maio/2006.

ŸILMAZ, O. **Seismic data processing**, Tulsa-Oklahoma, USA: Society of Exploration Geophysicists - SEG. 1987. 526p.

APÊNDICES

APÊNDICE A: *SCRIPTS* DE PROCESSAMENTO DO PACOTE SEISMIC UNIX

A.1 GEOMETRIA

A.1.1 **Dados Acústicos**

- Escrevendo os cabeçalhos fldr, tracf, tracl, ep e sx

```
geometry_1:
        suaddhead < secz.sep ns=8272 | \
        sushw key=dt a=360. | \
        sushw key=trid,delrt a=1,0 | \
        sushw key=tracl a=1 b=1 | \
        sushw key=fldr a=1 b=0 c=1 d=0 j=401 | \
        sushw key=tracf a=1 b=1 c=0 d=0 j=401 | \
        sushw key=ep a=1 b=0 c=1 d=0 j=401 | \
        sushw key=sx a=5000 c=50 d=0 j=401 | \
        suchw key1=gx key2=tracf key3=sx a=-5025 b=25 c=1 | \
        sushw key=offset a=-5000 b=25 c=0 d=0 j=401 >secz_geom1.su


resampling:
        suresamp <secz_geom1.su nt=1501 dt=0.002 >secz_geom1rs.su
```

- Escrevendo os cabeçalhos gx and offset

```
geometry_2:
        mkdir -p tmp
        for ((i=1; i<=201; i++)); do \
                suwind < secz_geom1rs.su key=fldr min=$$i max=$$i | \
                suwind key=offset min=-5000 max=-150 > tmp/tmp$$i.csg.l; \
                suwind < secz_geom1rs.su key=fldr min=$$i max=$$i | \
                suwind key=offset min=150 max=5000 > tmp/tmp$$i.csg.r; \
                cat tmp/tmp$$i.csg.l tmp/tmp$$i.csg.r > tmp/tmp$$i.csg; \
                rm -f tmp/tmp$$i.csg.l tmp/tmp$$i.csg.r; done
        cat `ls tmp/*.csg` > secz_geom2.su
        susort <secz_geom2.su fldr +fldr >secz_geom3.su
        rm -rf tmp
        rm -f secz_geom1.su secz_geom1rs.su secz_geom2.su
```

- Escrevendo os cabeçalhos cdp and cdpt

```
geometry_3:
        sushw <secz_geom3.su key=tracf a=1 b=1 c=0 d=0 j=390 | \
        suchw key1=cdp key2=gx key3=sx a=25 b=1 c=1 d=25 | \
      sushw key=scalel,scalco a=1,1 > secz_temp.su
        mkdir -p tmp_cmp
        for ((i=200; i<1401; i++));do j=$$(( $$i + 1 )); \
                suwind key=cdp min=$$j max=$$j < secz_temp.su > tmp_cmp/tmp$$j; \
                sushw < tmp_cmp/tmp$$j key=cdpt a=1 b=1 > tmp_cmp/tmp$$j.cmp; \
                rm -f tmp_cmp/tmp$$j; done
        cat `ls tmp_cmp/*.cmp` > secz_geom.su
```

A.1.2 **Dados Elásticos**

- Escrevendo os cabeçalhos fldr, tracf, tracl, ep e sx

```
data = amazonas_secz

geometry_1:$(data).su
        sushw < $< key=f1,d1,f2,d2 a=0.,0.002,0.,25. | \
        sushw key=trid,delrt a=1,0 | \
        sushw key=tracl a=1 b=1 | \
        sushw key=fldr a=1 b=0 c=1 d=0 j=390 | \
        sushw key=tracf a=1 b=1 c=0 d=0 j=390 | \
        sushw key=ep a=1 b=0 c=1 d=0 j=390 | \
        sushw key=sx a=5000 c=50 d=0 j=390 >$(data)_geom1.su
```

- Escrevendo os cabeçalhos gx and offset

```
geometry_2:$(data)_geom1.su
        mkdir -p tmp
        for ((i=1; i<201; i++)); do suwind < $< key=fldr min=$$i max=$$i | \
                suwind key=tracf count=195 | \
                suchw key1=gx key2=tracf key3=sx a=-5025 b=25 c=1 | \
           sushw key=offset a=-5000 b=25 c=0 d=0 j=195 > tmp/tmp$$i.csg.l; \
                suwind < $< key=fldr min=$$i max=$$i | \
                suwind key=tracf min=196 | \
                suchw key1=gx key2=tracf key3=sx a=-4750 b=25 c=1 | \
           sushw key=offset a=150 b=25 c=0 d=0 j=195 > tmp/tmp$$i.csg.r; \
                cat tmp/tmp$$i.csg.l tmp/tmp$$i.csg.r > tmp/tmp$$i.csg; \
                rm -f tmp/tmp$$i.csg.l tmp/tmp$$i.csg.r; done
        cat `ls tmp/*.csg` > $(data)_geom2.su
        rm -f $(data)_geom1.su
```

- Escrevendo os cabeçalhos cdp and cdpt

```
geometry_3:$(data)_geom2.su
        suchw < $< key1=cdp key2=gx key3=sx a=25 b=1 c=1 d=25 | \
      sushw key=scalel,scalco a=1,1 > $(data)_temp.su
        mkdir -p tmp_cmp
        for ((i=200; i<1397; i++));do j=$$(( $$i + 1 )); \
                suwind key=cdp min=$$j max=$$j < $(data)_temp.su > tmp_cmp/tmp$$j; \
                sushw < tmp_cmp/tmp$$j key=cdpt,d1,d2 a=1,0.002,12.5 b=1,0,0 >
tmp_cmp/tmp$$j.cmp; \
                rm -f tmp_cmp/tmp$$j; done
        cat `ls tmp_cmp/*.cmp` > $(data)_geom3.su
        rm -f $(data)_temp.su $(data)_geom2.su
```

A.2 REARRANJO DE CONFIGURAÇÃO DOS DADOS

- Famílias ponto médio comum (CMP)

```
susort < secz_geom.su > secz_geomCMP.su cdp offset
```

- Famílias fonte comum (FC)

```
susort < secz_geom.su > secz_geomFC.su fldr offset
```

- Famílias afastamento comum (AC)

```
susort < secz_geom.su > secz_geomAC.su offset fldr
```

A.3 FILTRAGEM

- Filtro Passa-banda

```
sufilter <secz_geomCS.su f=10,20,50,60 > secz_geomCS_bpf.su
```

- Filtro FK

```
sudipfilt < secz_geomFC.su d2=0.025 slopes=-0.30,-0.20,0.20,0.30 amps=0,1,1,0 >
secz_geomFC_fk.su
```

- Deconvolução

supef < secz_geomCS_fk.su minlag=0.030 maxlag=0.075 pnoise=0.008 > secz_geomCS_fk_pef.su

A.4 ANÁLISE DE VELOCIDADES

```
#! /bin/sh
# set -x

cmps=secz_geomCDP_fk_pef.su

if [ ! -f $cmps ]
then    echo "Sort to CMP first!"
        pause EXIT
        exit
fi

echo "Velocity Analysis"

rm -f panel.* picks.* par.* tmp*

#------------------------------------------------
# Definição das variáveis
#------------------------------------------------

indata=$cmps
outdata=vpick_amazonas
nt=1501
dt=0.002

nv=440      # Number of Velocities
dv=10       # Interval
fv=1500     # First Velocity

>$outdata   # Write an emty file
>par.cmp    # Write an emty file

#------------------------------------------------
# Análise de velocidades interativa
#------------------------------------------------

echo "How many Picks?" >/dev/tty
read nrpicks

i=1
```

```
while [ $i -le $nrpicks ]
do
   echo "Specify CMP Pick Location $i" >/dev/tty
   read picknow
   echo "Preparing Location $i of $nrpicks for Picking "
   echo "Location is CMP $picknow "

#-----------------------------------------------
# Mapa da família PMC
#-----------------------------------------------

   suwind <$indata key=cdp min=$picknow \
          max=$picknow |sushw key=d1 a=0 >panel.$picknow
   suxwigb <panel.$picknow xbox=312 ybox=10 \
           wbox=300 hbox=600 \
           title="CMP gather $picknow" \
           perc=96 key=offset verbose=0 &

#-----------------------------------------------
# Constant Velocity Stack
#-----------------------------------------------

   >tmp1
   j=1
   k=`expr $picknow + 10`
   l=`bc -l <<-END
   $dv * $nv / 120
   END`

   suwind <$indata key=cdp min=$picknow \
          max=$k >tmp0

   while [ $j -le 10 ]
   do
          vel=`bc -l <<-END
          $fv + $dv * $j * $nv / 10
          END`

echo "$j velocidade constante eh: $vel"

          sunmo <tmp0 vnmo=$vel |

          sustack >>tmp1
       sunull ntr=2 nt=$nt dt=$dt >>tmp1
       j=`expr $j + 1`
   done
   suximage <tmp1 xbox=624 ybox=10 wbox=300 hbox=600 \
```

```
            title="Constant Velocity Stack CMP $picknow" \
            label1="Time [s]" label2="Velocity [m/s]" \
            f2=$fv d2=$l verbose=0 mpicks=picks.$picknow \
            perc=99 n2tic=5 cmap=rgb0 &

#-----------------------------------------------
# Mapa do Semblance
#-----------------------------------------------

   echo "Place the cursor over the semblance plot or the"
   echo "constant velocity stack and typ 's' to pick velocities."
   echo "Type 'q' in the semblance plot when all picks are made."
   echo "A NMO corrected gather will be plotted after picking"

suvelan <panel.$picknow nv=$nv dv=$dv fv=$fv |
   suximage wclip=0.0 bclip=0.5 xbox=1 ybox=10 wbox=300 hbox=600 \
            units="semblance" f2=$fv d2=$dv \
            label1="Time [s]" label2="Velocity [m/s]" \
            title="Semblance Plot CMP $picknow" cmap=hsv2 \
            legend=1 units=Semblance verbose=0 gridcolor=black \
            grid1=solid grid2=solid mpicks=picks.$picknow

   sort <picks.$picknow -n |
   mkparfile string1=tnmo string2=vnmo >par.$i

#-----------------------------------------------
# Mapa do NMO e o Perfil de Velocidades
#-----------------------------------------------

   >tmp2
   echo "cdp=$picknow" >>tmp2
   cat par.$i >>tmp2
   sunmo <panel.$picknow par=tmp2 |
   suxwigb title="CMP gather after NMO" xbox=1 ybox=10 \
            wbox=300 hbox=600 verbose=0 key=offset perc=94 &
      sed <par.$i '
         s/tnmo/xin/
         s/vnmo/yin/
               ' >par.uni.$i
   unisam nout=$nt fxout=0.0 dxout=$dt \
          par=par.uni.$i method=mono |
   xgraph n=$nt nplot=1 d1=$dt f1=0.0 \
         label1="Time [s]" label2="Velocity [m/s]" \
          title="Stacking Velocity Function CMP $picknow" \
         -geometry 200x600+934+10 style=seismic &

   echo "Picks OK? (y/n) " >/dev/tty
```

```
   read response
   rm tmp*

   case $response in
         n) i=$i echo "Picks removed" ;;
      y) i=`expr $i + 1`
         echo "$picknow  $i" >>par.cmp ;;
      *) echo "digite y para yes e n para nao";;
   esac

done
#-----------------------------------------------
# Geração do arquivo de saída
#-----------------------------------------------

mkparfile <par.cmp string1=cdp string2=# >par.0

i=0
while [ $i -le $nrpicks ]
do
         cat par.$i >>$outdata
         i=`expr $i + 1`
done

rm -f panel.* picks.* par.* tmp*

exit
```

A.5 CORREÇÃO NMO

```
sunmo < secz_geomCS_fk_pef.su  par=vpick_amazonas > secz_nmo_amazonas.su
```

A.6 SILENCIAMENTO (*Muting*)

```
sumute < secz_nmo_amazonas.su > secz_mute_amazonas.su key=offset tmute=3,0,3 xmute=-5000,0,5000
```

A.7 EMPILHAMENTO HORIZONTAL

```
sustack < secz_mute_amazonas.su > secz_stack_amazonas.su
```

A.8 MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO EM PROFUNDIDADE PELO MÉTODO SPLIT-STEP

A.8.1 **Suavização do modelo de velocidades da onda p**

```
smooth2 <velp_am.dat n1=801 n2=4001 r1=20 r2=20 >velp_am_sm1.dat
smooth2 <velp_am_sm1.dat n1=801 n2=4001 r1=20 r2=20 >velp_am_sm2.dat
smooth2 <velp_am_sm2.dat n1=801 n2=4001 r1=20 r2=20 >velp_am_sm3.dat
```

A.8.1 **Edição do modelo de velocidades**

```
suaddhead < velp_am_sm3.dat ns=801 | sushw key=dt,d2 a=5,5 | sushw key=sx a=0. b=5. d=0
j=4001 > velp_am_sm3.su
suwind < velp_am_sm3.su key=tracl min=991 max=3001 j=10 > velp_am_sm3_edit.su
sustrip <velp_am_sm3_edit.su >velp_am_sm3_edit.bin
transp n1=801 <velp_am_sm3_edit.bin >velp_am_sm3_edit_transp.bin
```

A.8.2 **Migração pós-empilamento em profundidade *split-step***

```
sumigsplit < secz_stack_amazonas_gf.su nz=801 dz=5.0
vfile=/home/priscila/acustico/modelos/amazonas/velp_am_sm3_edit_transp.bin dx=50.0 >
secz_stack_amazonas_gf_split.su
```