

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ CENTRO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS REAIS DA REGIÃO AMAZÔNICA

**ANDERSON BATISTA GOMES** 

### ANDERSON BATISTA GOMES

# PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS REAIS DA REGIÃO AMAZÔNICA

Como requisito parcial à obtenção de grau de mestre em ciências na área de geofísica pela Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Departamento de Geofísica, Curso de Pós-graduação em Geofísica, orientado pelo Prof. Dr. Lourenildo Williame Barbosa Leite.

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

Gomes, Anderson Batista

**Processamento de dados sísmicos reais da região Amazônica** / Anderson Batista Gomes; Orientador, Lourenildo Williame Barbosa Leite. – 2006

95f.: il

Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2006.

1.Geofísica 2.Processamento sísmico 3.Sísmica de reflexão 4.Correção NMO/DMO 5.Análise de velocidade 6.Amazônia I.Leite, Lourenildo Williame Barbosa, Orient. II. Título.

CDD 20. ed.: 558.11

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ CENTRO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFISICA

# PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS REAIS DA REGIÃO AMAZÔNICA

# DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

#### ANDERSON BATISTA GOMES

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

**APROVADA EM: 17/05/2006** 

**BANCA EXAMINADORA:** 

Prof. Dr, Lourenildo Williame Barbosa Leite (Orientador)

Prof. Dr. Milton José Porsani

Profa. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes



#### **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Lourenildo W. B. Leite pela sugestão do tema deste trabalho e constante paciência e disponibilidade de tempo na orientação desta dissertação.

Aos membros da Banca examinadora, Profa. Dra. Ellen N. S. Gomes e Prof. Dr. Milton J. Porsani, pelas sugestões para a realização de um melhor trabalho.

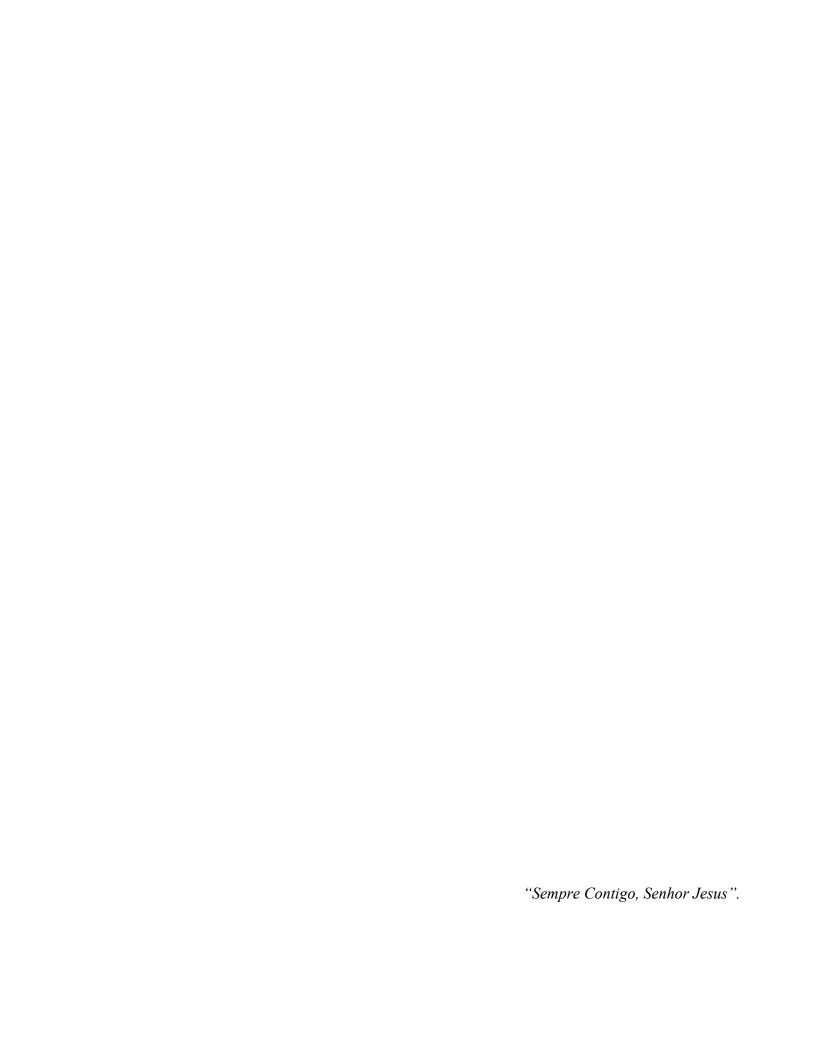
A CAPES e ao CNPq pelo financiamento da bolsa de estudo.

Ao projeto Rede Risco Exploratório (CTPETRO/CNPq-FINEP 03/2001-Fase 2. *Modelagem Sísmica e Visualização 3-D de Bacias Sedimentares em Alvos Exploratórios*) pelo suporte à pesquisa em desenvolvimento, sem a qual os trabalhos de pesquisa teriam muita dificuldade em serem realizados.

Ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica da UFPA pelo suporte acadêmico para a elaboração deste trabalho, bem como a todo o corpo docente e funcionários do Curso de Pós-graduação em Geofísica e do Departamento de Geofísica, e em especial à Sra. Benildes Lopes a minha gratidão.

Aos professores José Miguel Martins Veloso e Marcos Pinto da Costa Rocha, e à Profa. Midori Makino cujas cartas de recomendação me oportunizaram cursar o CPGf.

A todos os colegas do CPGf, e em especial aos colegas Francisco Assis da Silva Neto e Carlos Augusto Sarmento por compartilharem seus conhecimentos.



#### **RESUMO**

O tratamento de dados sísmicos divide-se basicamente em três partes: o préprocessamento, o processamento e o imageamento. Na presente dissertação discutimos as etapas de pré-processamento e dois importantes métodos de processamento voltados à simulação de seções afastamento-nulo (AN) a partir de dados de cobertura múltipla.

O processamento Convencional (NMO/DMO) e o processamento Superficie de Reflexão Comum (CRS) foram aplicados a dados sísmicos de reflexão de algumas linhas sísmicas do grupo 204 do conjunto de dados do Graben do Tacutu (Brasil). Usamos o Sistema CWP/SU para realizar as etapas de pré-processamento e de processamento convencional (NMO/DMO). O processamento CRS foi realizado com o Sistema WIT/CRS.

As etapas de pré-processamento consistiram basicamente de três partes: organização da geometria; cancelamento e silenciamento de traços ruidosos; e filtragem na freqüência temporal (filtro em f) e na velocidade (filtro f-k). A etapa de deconvolução foi realizada, porém devido a um resultado que não trouxe contribuições, os resultados não tiveram uso posterior. Também, a correção estática de elevação não foi realizada porque a topografía é muito suave (variação topográfica menor do que 20 m) no platô do Tacutu.

A qualidade dos resultados do processamento NMO/DMO foi fortemente comprometida devido à dependência do método do modelo de velocidade, que neste caso não foi suficientemente preciso. Além disso, encontramos dificuldades na análise de velocidade (AV) devido à grande quantidade de ruído presente nos dados. Como consequência, a correção de sobre-tempo normal ("Normal Moveout", NMO) e a migração não geraram resultados melhores.

Fundamentado nos atributos estimados pelo método de empilhamento CRS, foi obtido um macro-modelo de velocidades através de inversão tomográfica de reflexão. Usando este macro-modelo, foram realizadas migrações em profundidade pré- e pós-empilhamento. Também, os atributos CRS são usados no método correção estática residual, e os resultados demonstraram uma melhora na resolução das seções empilhadas.

As seções resultantes dos empilhamentos e das migrações foram interpretadas visando o delineamento de estruturas. A partir dos detalhes visuais dos painéis, interpretamos afinamentos, um anticlinal principal falhado e desconformidades, e conjuntos de horsts e grabens foram traçados. Em contrapartida, o embasamento não pode ser facilmente traçado.

Palavras chave: processamento sísmico, correção NMO, análise de velocidade, empilhamento, sísmica de reflexão.

#### **ABSTRACT**

The treatment of seismic data is divided basically in three parts: preprocessing and processing an imaging. In the present thesis we discuss the stages of preprocessing and two important methods of processing directed to the simulation of zero offset (ZO) sections from multiple coverage data.

Conventional (NMO/DMO) processing, and the Common Reflection Surface (CRS) processing have been applied to seismic data from some seismic lines of group 204 of the data set of the Tacutu Graben (Brazil). We used the CWP/SU System to carried out the stages of preprocessing and the stage of conventional (NMO/DMO) processing. The CRS processing was carried out with WIT/CRS System.

The stages of preprocessing consisted basically of three parts: organization of the geometry; zeroing and muting of noisy traces; and filtering in the temporal frequency (f filter) and velocity filter (f-k filter). Deconvolution was carried out, however due to results that did not bring any information; the results were not of further use. Besides, the elevation static correction was not applied because the topography is very smooth (elevation variation less than 20 m) in Tacutu plateau.

The quality of the results of NMO/DMO processing was strongly biased due to the dependence of the method on a velocity model, that in this case it was accurate enough. We also found difficulties with the velocity analysis (VA) due to great amount of noise present in the data. As a consequence, the normal moveout correction (NMO) and migration did not generate better results.

Based on the estimated attributes of the CRS stack method, a smooth macrovelocity model was obtained using reflection tomographic inversion. Using this macro-model, pre- and post- stack depth migration were carried out. Also, the CRS attributes are used in the method residual static correction, and the results demonstrate a better resolution of the stacked section.

The sections resulting from stack and migration have been interpreted aiming at the delineation of structures. From the visual details of the panels, we have interpreted thinning, a main faulted anticline and discontinuity, and plays of horsts and grabens, and rollovers were traced. On the other hand, the basement could not easily be traced.

Keywords: seismic processing, NMO correction, velocity analysis, stack, seismic reflection.

# **SUMÁRIO**

		p.
RESU	UMO	
ABST	ГКАСТ	
LIST	A DE ILUSTRAÇÕES	
LIST	A DE SIGLAS	
LIST	A DE SÍMBOLOS	
1	INTRODUÇÃO	18
2	DESCRIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO	22
3	DESCRIÇÃO DO MÉTODO SÍSMICO	24
3.1	CONFIGURAÇÕES	24
3.2	RESOLUÇÃO TEMPO-ESPACIAL	29
3.2.1	Teorema Wittaker-Shannon-Koltenikov	29
3.2.2	Amostragem e resolução temporal	30
3.2.3	Amostragem e resolução espacial	32
3.3	MODELO CONVOLUCIONAL	35
3.4	EQUAÇÃO DE ONDA E MODELOS	37
3.4.1	Modelo de camadas com interfaces plano-horizontais	38
3.4.2	Modelo de camadas com interfaces plano-inclinadas	43
3.4.3	Modelo de camadas com interfaces curvas	44
4	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NMO/DMO	50
4.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	50
4.2	PROCESSAMENTO CONVENCIONAL	60
4.2.1	Análise de velocidade	60
4.2.2	Empilhamento NMO	63
4.2.3	Empilhamento DMO	69
4.2.4	Migração	71
5	RESULTADOS DO SISTEMA WIT/CRS	73
5.1	ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA E EMPILHAMENTO	75
5.2	MARCAÇÃO DE ȚEMPOS E TOMOGRAFIA	80
5.3	CORREÇÃO ESTÁTICA RESIDUAL	82
5.4	MIGRAÇÃO	84
6	CONCLUSÕES GERAIS	86
REFI	ERÊNCIAS	92

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

# **FIGURAS**

Figura 1.1	Etapas principais do processamento convencional (NMO/DMO). Mostrando as etapas de pré-processamento e processamento. O
	fluxograma ilustra quatro caminhos que podem levar a resultados distintos. Foram testados dois filtros diferentes e a etapa de deconvolução mostrou-se opcional
Figura 1.2	Etapas principais do processamento de dados sísmicos de reflexão no domínio do tempo e profundidade. Procedimentos que podem ser incorporados ao fluxograma do empilhamento baseado no método CRS estão destacados em amarelo
Figura 2.1	Mapa estrutural do graben do Tacutu redesenhado de Eiras e Kinoshita (1990) mostrando a direção de algumas linhas sísmicas
Figura 3.1	Ilustração da configuração FC (fonte-comum) com um arranjo unilateral utilizada na aquisição de dados de reflexão, onde todos os raios partem do mesmo ponto espacial. Como regra geral, o ângulo de incidência formado com a vertical deve medir menos que 20° no método da reflexão sísmica, que nesta condição não permite muita conversão P-SV
Figura 3.2	Ilustração da configuração AC (afastamento-comum) caracterizada pela distância fonte-receptor constante
Figura 3.3	Ilustração da configuração AN (afastamento-nulo) onde a distância fonte-receptor é zero. Considerando o tempo-simples, esta seção é interpretada como "refletor em explosão" em interface plano-horizontal, e que equivale à onda hipotética denominada de Onda Normal (onda-N)
Figura 3.4	Ilustração da simetria da configuração ponto-médio-comum (PMC) com o ponto-comum-em-profundidade (PCP), mostrando a iluminação pontual em subsuperfície. Os receptores estão à direita e correspondem às fontes à esquerda, e o caso contrário também é possível
Figura 3.5	Ilustração da configuração PMC para um refletor plano-inclinado. Neste caso, não existe um PCP para coincidir com o PMC devido à inclinação do refletor, estando a iluminação distribuída numa área (superfície de reflexão comum). Os receptores à direita correspondem às fontes à esquerda, e vice-versa
Figura 3.6	Cubo de dados de multicobertura onde estão ilustrados os arranjos afastamento-comum (AC = CO), fonte-comum (FC = CS) e ponto-médio-comum (PMC = CMP)
Figura 3.7	Regiões com e sem energia a partir de um painel de bi-frequência. (a) Energia em $(k_s, k_r)$ é limitado pelas linhas $k_{s,r} = \pm f/V_{min}$ . (b) Energia em $(k_m, k_o)$ não é limitada pelas linhas $k_m = \pm 2f/V_{min}$ e $k_0 = f/V_{min}$ , mas pelo mapeamento em forma de losango da área hachurada, uma vez que a
	velocidade aparente ao longo de $x_m$ , $v_m$ , é igual a $v_r/2$

Figura 3.8	Ilustração da resposta clássica do receptor (transdutor eletromagnético)
Figura 3.9	com os amortecimentos subcrítico, crítico e supercrítico
	localizados no mesmo ponto S. $h_0$ é a distância vertical ao refletor. $R_n$ são os raios das ZF, medidas a partir do ponto $P_0$ , $dR$ é o infinitesimal do raio
Figura 3.11	Fatores físicos que influenciam as amplitudes das ondas sísmicas (Desenhado a partir de Sheriff, 1975)
Figura 3.12	Exemplo de seção FC para mostrar o comportamento dos eventos, onde são observadas reflexões com forma hiperbólica/parabólica, e que se pode modelar por camadas plano-horizontais como primeira aproximação. As ondas de superfície foram atenuadas com o filtro $f-k$
Figura 3.13	Modelo de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas) entre dois semi-espaços (meio 1D). Indicação da numeração das camadas e da geometria da divergência esférica. A simetria é radial
Figura 3.14	Ilustração dos trajetos hiperbólicos e janelas envolvidos no cálculo da função semblance, na correção NMO e no empilhamento NMO
Figura 3.15	Desenho do modelo 2D de camadas homogêneas, isotrópicas com interfaces plano-inclinadas, onde estão representados os parâmetros velocidade $v_i$ , e os ângulos $\alpha_i$ e $\beta_i$ das equações envolvidas. Este
Figura 3.16	modelo é denominado de iso-velocidades. Cunhas não participam da abertura da observação
-	empilhamento CRS. O ângulo de emergência do raio central $\beta_0$ . (esquerda) A curvatura da onda NIP contém informações da distância do ponto de incidência normal ao ponto de observação $x_0$ . (direita) O raio de curvatura da onda N contém informações da curvatura do refletor
Figura 3.17	Representação geométrica do sistema paraxial com um refletor $\Sigma$ , um raio central de incidência normal $X_0 R X_0$ , e um raio paraxial de reflexão primaria $SR'G$ . A curva azul representa a frente de onda NIP ( $\Sigma$ NIP), e a curva de cor vermelha representa a frente de onda N ( $\Sigma$ N)
Figura 3.18	Modelo 2D de camadas com interfaces curvas mostrando o raio central de referência (incidência normal, NIP) e uma trajetória PMC com afastamento 2h (Hubral, 1980)

Figura 3.19	Parte inferior: Modelo composto por três camadas homogêneas. O raio de ZO (ou de incidência normal) tem cor vermelha. Parte superior: Superfície de cobertura múltipla (linhas em azul) correspondente às reflexões da segunda interface. A linhas de cor vermelha definem a superfície de empilhamento CRS, correspondente ao ponto de reflexão <i>R</i> , calculada através da aproximação hiperbólica do tempo-duplo de trânsito	49
Figura 4.1	Exemplo do arranjo de campo para a linha Tacutu 204-239. Direção: NE-SW. Extensão: 31,5km. Espaçamento entre estações: 50m. Total de estações (E): 631. Espaçamento entre fontes: 50m. Primeiro receptor: 100m da fonte. Primeiro ponto de registro: E=9. Distribuição das estações: E=9 à E=57 o arranjo é (0-48); da E=8 à E=259 o arranjo é (48-48); da E=260 à E=610 o arranjo é (76-20) e da E=611 à E=631 o arranjo é (76-0).	50
Figura 4.2	Espectro de freqüência vs número do traço de todos os traços da linha 204-239 antes da aplicação de filtragens banda-passante, e antes de silenciamento. Observa-se a presença de sinal até na freqüência de 125 Hz. Pela análise visual voltado à componente determinística da seção, o conteúdo importante de freqüências está relacionado à faixa 5-40 Hz, sendo a faixa acima de 40Hz considerada como ruído	53
Figura 4.3	Espectro de frequência vs número do traço de todos os traços da linha 204-239 antes da aplicação de filtragens banda-passante, e depois de silenciamento. Os traços zerados podem ser vistos como linhas do início ao fim da figura	53
Figura 4.4	Frequência vs número do traço. Composição do espectro de frequência para todas os traços de uma seção FC da linha 204-239 (número 200) antes da aplicação de filtragens banda-passante, e depois de silenciamento, e corresponde a um detalhe da figura anterior par servir em teste de filtros. A escala de amplitude em cores reflete o ganho para a apresentação	54
Figura 4.5	Freqüência vs número do traço. Espectro de freqüência para todas os traços de uma seção CSG da linha 204-239 (número 200) após a aplicação da filtragem <i>F</i> banda-passante, e depois de silenciamento. Esta figura corresponde a um detalhe da figura anterior, e serviu para o teste dos filtros. O filtro banda-passante trapezoidal tem os cantos 7-12-35-45 Hz	54
Figura 4.6	Seção FC-200 tempo vs distância da linha 204-239 antes da aplicação do filtro <i>F</i> banda-passante. Para efeito de visualização estão apresentadas duas seções: (esquerda) Seção sem ganho; (direita) seção com ganho	55
Figura 4.7	Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239 após a aplicação de dois filtros banda-passante <i>F</i> : (esquerda) saída com o filtro <i>F</i> com a opção de cantos 7-12-35-45 Hz; e (direita) saída do filtro <i>F</i> com a opção de cantos 8-20-40-45 Hz. A estas seções não foi aplicado ganho dinâmico.	55

Figura 4.8	Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239 após a aplicação de dois filtros banda-passante <i>F</i> seguidos de controle de ganho dinâmico (DGC): (esquerda) saída com o filtro <i>F</i> com a opção de cantos 7-12-35-45 Hz; e (direita) saída do filtro <i>F</i> com a opção de cantos 8 20 40 45 Hz
Figura 4.9	cantos 8-20-40-45 Hz
Figura 4.10	0,00035; -0,00005; +0,0005; +0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0)
Figura 4.11	Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do filtro <i>F-K</i> nas figuras anteriores com os parâmetros de inclinação (-0,00035; -0,0005; -0,00005; 0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0). Ambas as seções não possuem ganho dinâmico para comparar com as próximas figuras. Observa-se a destruição parcial da forma Delta onde as refrações estão presentes.
Figura 4.12	Seção FC-200 da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do filtro <i>F-K</i> . Ambas as seções possuem ganho dinâmico para comparar com as figuras anteriores
Figura 4.13	Seção FC-200 da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do processo de deconvolução ao impulso Wiener-Hopf-Levinson. A seção utilizada passou pelos filtros <i>F</i> e <i>F-K</i> como visto nas figuras anteriores
Figura 4.14	Espectros de velocidades calculados utilizando o critério de coerência semblance a partir das seções CDP (da esquerda para a direita, de cima para baixo) de número 5450, 10450, 15450, 20450, 25450, 30450. Seções tempo vs velocidade. Exemplo da análise de velocidade SU/NMO da linha Tacutu-204-239
Figura 4.15	Seções tempo vs afastamento. Exemplo da análise de velocidade SU/NMO da linha Tacutu-204-239 FC-1000
Figura 4.16	Seção empilhada NMO 1D completa (janela 4,0s x 31,5km) da linha 204-239. Observa-se que as estruturas esperadas estão representadas numa janela limitada a 2,0 s x 20,0 km
Figura 4.17	Seção empilhada NMO 1D da linha 204-239 (janela 2,0 s x 20,0 km) sem deconvolução
Figura 4.18	Seção empilhada NMO (janela 2,0 s x 20,0 km) gerada a partir de um modelo 2D de velocidades
Figura 4.19	Seção empilhada NMO 1D (janela 4,0s x 31,5km) da linha 204-239 simulada após a deconvolução WHL ao impulso. Observa-se que as estruturas estão mal expostas e limitadas à janela de 2,0 s x 20,0 km

Figura 4.20	Seção empilhada NMO 1D (janela 2,0 s x 20,0 km) da linha 204-239	
	com deconvolução WHL	68
Figura 4.21	Linha 204-239. Seção empilhada DMO completa (janela 4s x 31,5km).	69
Figura 4.22	Seção mostrando o resultado do empilhamento NMO/DMO 1D da	70
Eigung 4 22	linha 204-239 limitada à janela 2,0 s x 20,0 km	70
Figura 4.23	Seção migrada completa (janela 4,0 s x 31,5 km) no tempo resultante	
	da aplicação da técnica SU/Gazdag sobre a seção empilhada NMO	71
Figura 4.24	completa da Figura 4.16	71
Figura 4.24	destacadas nesta janela (2,0 s x 20,0 km) para análise de detalhes	72
Figura 5.1	Painel da densidade de traços da Coerência Semblance da seção	12
1 Iguiu 3.1	$P_0 = (x_0, t_0)$	76
Eigung 5.2		70
Figura 5.2	Painel da distribuição da função Coerência Semblance dos pontos	76
	$P_0 = (x_0, t_0)$ da seção tempo vs distância.	76
Figura 5.3	Distribuição do atributo $R_{NIP}$ para os pontos $P_0 = (x_0, t_0)$ da seção	
	tempo vs distância (posição do CMP da origem da linha)	77
Figura 5.4	Distribuição do atributo $R_N$ para os pontos $P_0 = (x_0, t_0)$ da seção	
	tempo vs distância.	77
Figura 5.5	Distribuição do atributo $\beta_0$ para os pontos $P_0 = (x_0, t_0)$ da seção	
C	tempo vs distância	78
Figura 5.6	Resultado do empilhamento ao afastamento-nulo simulado a partir dos	
1 1guru 5.0	atributos apresentados nas figuras anteriores. Figura tempo vs distância	
	(do CMP da origem da linha)	78
Figura 5.7	Resultado do empilhamento ao afastamento-nulo simulado a partir dos	, ,
<i>8</i>	atributos apresentados nas figuras anteriores, onde está destacada a	
	faixa 2,0s x 20,0km para uso na interpretação por delineamento de	
	refletores	79
Figura 5.8	Distribuição da marcação automática de tempo vs distância com edição	
	da seção empilhada ao afastamento-nulo da Figura 5.7	80
Figura 5.9	Modelo de macro-velocidade. Distribuição de velocidade vs tempo-	
	distância obtida do processo de inversão a partir do arquivo gerado na	
	marcação tempo vs distância mostrada na Figura 5.8	81
Figura 5.10	Resultado da seção empilhada completa ao afastamento-nulo simulada	
T' 5.1.1	a partir da correção estática residual (CER) após duas iterações	82
Figura 5.11	Seção janela da seção anterior empilhada ao afastamento-nulo com	0.2
E: 5 12	CER de duas iterações	83
Figura 5.12	Seção migrada pré-empilhamento (sem CER) à profundidade obtida a	0.4
Eiguro 5 12	partir do modelo de macro-velocidades de figura anterior	84
Figura 5.13	Seção migrada pós-empilhamento (sem CER) à profundidade obtida a partir do modelo de macro-velocidades de figura anterior	85
Figura 6.1	Seção interpretada a partir da Figura 5.10 da seção empilhada CRS	0.5
1 15u1u 0.1	completa ao afastamento-nulo simulada a partir da correção estática	
	residual (CER) após duas iterações. A ser comparada com as Figuras	
	6.2 e 6.3	89

Figura 6.2	Seção interpretada a partir da Figura 5.11 da seção Empilhamento CRS	
	(ZO com CER), otimizado e Fresnel limitado à janela 2,0 s x 20,0 km.	
	A interpretação realizada é de delineamento de estruturas. Informações	
	de outras seções são consideradas no traçado geométrico das estruturas	
	delineadas que visam demonstrar a dinâmica do Graben do Tacutu	90
Figura 6.3	Seção interpretada a partir da seção migrada em profundidade tipo	
	Kirchhoff (Figura 5.13), pós-empilhamento, resultante do	
	empilhamento CRS (ZO com CER), otimizado e Fresnel	91

# LISTA DE SIGLAS

	DESCRIÇÃO
AC	Afastamento-comum
AN	Afastamento-nulo
CRS	"Common-reflection-surface", superficie-de-reflexão-comum
FC	Fonte-comum
IZF	Interface da zona de Fresnel
NIP	Ponto-de-incidência-normal
NMO	"Normal moveout", sobre-tempo normal
PCP	Ponto-comum-em-profundidade
PMC	Ponto-médio-comum
PRC	Ponto-de-reflexão-comum
PZF	Primeira zona de Fresnel
PZFP	Primeira zona de Fresnel projetada
RC	Receptor-comum
VF	Volume de Fresnel
WSK	Wittaker- Shannon- Koltenikov
ZF	Zona de Fresnel
ZFP	Zona de Fresnel Projetada

# LISTA DE SÍMBOLOS

	DESCRIÇÃO
$\Delta h$	Espaçamento na direção-h
$\Delta x$	Espaçamento na direção-x
$\Delta x_r$	Espaçamento entre os receptores
$\Delta x_s$	Espaçamento entre as fontes
λ	Comprimento de onda
ρ	Densidade
$ au_{arepsilon}$	Pulso-fonte efetivo
$\omega_i$	Frequência angular inferior
$\omega_p$	Frequência de energia máxima
$\omega_s$	Frequência angular superior
$\mathcal{X}_S$	Coordenada da fonte
P	pressão
p	Parâmetro horizontal do raio
$\mathcal{X}_m$	Coordenada ponto-médio-comum
g(t,p)	Traço sísmico modelado
T(p)	Tempo-duplo de propagação
$v_{rms}$	Velocidade média-quadrática
$v_{NMO}$	Velocidade de correção sobre-tempo normal
h	Meio-afastamento entre fonte-receptor
2h	Afastamento entre fonte-receptor
X(p)	Afastamento em termos do parâmetro horizontal do raio
$v_i$	Velocidade na i-ésima camada
$X_0$	Ponto de observação ao longo da linha sísmica
$P_0$	Ponto de referência
$m^{est}$	Parâmetros estimados
$cov_u$	Covariância unitária
G	Matriz Hessiana
$h_0$	Distância vertical ao refletor
$R_n$	n-ésimo raio da Zona de Fresnel
dR	Infinitesimal do raio
T	Período da onda
$t_D$	Tempo duplo de difração
$t_R$	Tempo duplo de reflexão
i	i-ésima interface
$r_F$	Raio da zona de Fresnel

### 1 INTRODUÇÃO

Objetivando a caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos (óleo e gás), o método sísmico precisa percorrer um longo caminho que começa com a exploração sismológica, a qual faz uso de ondas sísmicas geradas artificialmente para produzir dados sísmicos como, por exemplo, os de reflexão, que irão passar por uma etapa de processamento que irá prepará-los para a obtenção de uma imagem representativa da geologia da subsuperfície para finalmente, ser interpretada por uma equipe cuja missão é identificar estruturas e artefatos geológicos e distribuições de diferentes tipos de rochas.

Na presente dissertação iremos estudar os processamentos Convencional (empilhamento NMO/DMO) e o Superfície de Reflexão Comum (CRS, do inglês Common Reflection Surface), ambos aplicados a dados reais do Graben do Tacutu (linha 204-239), localizado no estado de Roraima na fronteira Brasil-Guiana. O processamento sísmico convencional (empilhamento NMO/DMO), bem como as migrações pré- e pós-empilhamento, necessitam de um modelo de macro-velocidades suficientemente preciso para se obter resultados satisfatórios. O método de empilhamento CRS, por sua vez, apresenta como principal vantagem a independência de um modelo de macro-velocidades, tendo o trabalho de Mann et al. (1999) mostrado a aplicação a dados reais, e o de Jäger et al. (2001) apresentado o fluxograma do processamento. O objetivo destas duas rotinas de processamento é a simulação das seções afastamento-nulo. O processamento convencional realiza uma correção de sobre tempo normal (NMO, do inglês Normal Moveout) e uma correção de sobre tempo com mergulho (DMO, do inglês Dip Moveout) seguida do empilhamento das seções afastamento-nulo simuladas. A correção NMO leva em consideração a influência do afastamento nos refletores horizontais, mas não avalia o mergulho dos refletores. A subsequente correção DMO considera a influência do mergulho no tempo de trânsito. O processamento CRS simula as seções afastamento nulo a partir de três parâmetros que são determinados de forma automática através de uma procedimento de busca e análise de coerência, estes parâmetros são: o raio da frente de onda de ponto de incidência normal  $R_{NIP}$ ; o raio da frente de onda normal  $R_N$  e o ângulo de emergência do raio afastamento nulo  $\beta_0$ . O empilhamento CRS se estabelece como um processamento especial alternativo, ou complementar ao NMO/DMO. O modelo de velocidades gerado como um subproduto do empilhamento CRS pode ser utilizado nas etapas de correções NMO/DMO e migrações Gazdag do processamento convencional e Kirshhoff do processamento CRS.

Todas as etapas realizadas durante o processamento compõem o chamado fluxograma de processamento sísmico. As Figuras 1.1 e 1.2 ilustram os fluxogramas dos processamentos aqui realizados.

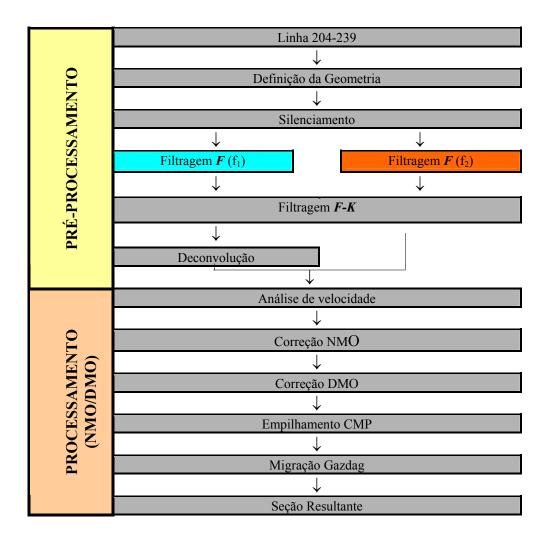


Figura 1.1. Etapas principais do processamento convencional (NMO/DMO) realizado com o software livre Seismic Un\*x mostrando as etapas de pré-processamento e processamento. O fluxograma ilustra quatro caminhos que podem levar a resultados distintos. Foram testados dois filtros diferentes e a etapa de deconvolução mostrou-se opcional.

O presente estudo faz parte do projeto Rede Risco Exploratório (FINEP 01/03, 22.01.0763.00: Modelagem Sísmica e Visualização 3D de Bacias Sedimentares em Alvos

Exploratórios), que reúne esforços de universidades do Norte e Nordeste (UFPA, UFBA, UFRN, UFCE, UFPE e a UFAL) para desenvolver tecnologia voltada a exploração de hidrocarbonetos (petróleo e gás).

Os dados reais utilizados neste trabalho foram levantados pela PETROBRAS no ano de 1980 e obtidos através do Prof. Dr. Milton José Porsani da Universidade Federal da Bahia e Coordenador da Rede Risco Exploratório, que os adquiriu na Agência Nacional de Petróleo (ANP) para finalidades acadêmicas. Estes dados são brutos (isto é, não haviam sido préprocessados). Além da complexidade das estruturas em subsuperfície, a topografia, bem como restrições ambientais e demográficas podem ter contribuído para a baixa qualidade dos dados de campo. Isto pode ser verificado no relatório de campo fornecido.

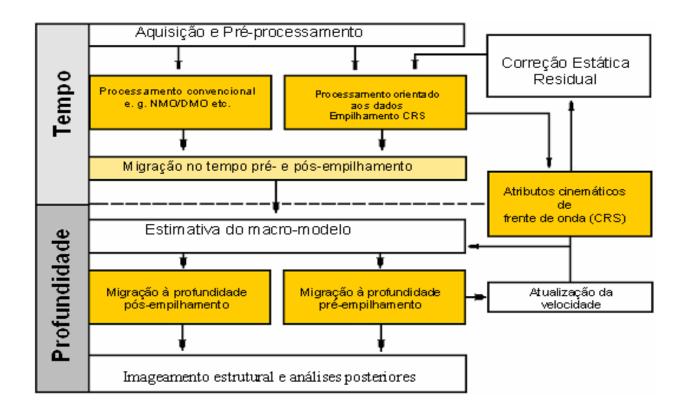


Figura 1.2. Etapas principais do processamento de dados sísmicos de reflexão no domínio do tempo e profundidade realizado com o sistema WIT/CRS de processamento. Os Procedimentos que podem ser incorporados ao fluxograma do empilhamento baseado no método CRS estão destacados em amarelo.

O software utilizado para o processamento convencional foi o software livre Seismic Un\*x (SU) do Center of Wave Phenomena (CWP) desenvolvido pela "Colorado School of

Mines" (STOCKWELL; COHEN, 2002); para o processamento CRS utilizou-se o sistema WIT/CRS do Geophysikalisches Institut da Universidade de Karlsruhe, Alemanha.

No primeiro Capítulo fazemos uma breve introdução a respeito dos métodos de processamento sísmico, no segundo discutimos aspectos relevantes que caracterizam a geologia da bacia sedimentar do Tacutu. No terceiro Capítulo introduzimos alguns conceitos básicos e fundamentais necessários para a compreensão do método sísmico e das etapas de processamento. No Capítulo quatro apresentamos alguns conceitos e resultados do processamento convencional NMO/DMO. No Capítulo cinco apresentamos alguns conceitos e resultados obtidos pelo processamento Superfície de Reflexão Comum (CRS). No Capítulo seis reunimos as conclusões gerais.

## 2 DESCRIÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

Este trabalho resume resultados práticos de uma atenção sistemática dada ao processamento e à interpretação sísmica de algumas linhas terrestres do conjunto de dados 204 do graben do Tacutu (Brasil). A Figura 2.1 ilustra o mapa do Graben do Tacutu mostrando a distribuição de algumas linhas sísmicas.

O modelo geológico que serve de motivação ao presente trabalho de pesquisa está relacionado ao problema de Risco Exploratório de hidrocarbonetos (óleo e gás) nas bacias sedimentares da região Amazônica, como tema prioritário para a Agência Nacional de Petróleo, e como parte do projeto FINEP em andamento no Departamento de Geofísica da UFPA.

Seguindo Eiras e Kinoshita (1990), a bacia sedimentar mesozóica do Tacutu, também conhecida na Guiana como Rifte das Savanas do Norte (North Savannas Rifty Valley), desenvolveu-se como um rifte intracontinental na parte central da área cratônica denominada de Escudo das Guianas, na fronteira entre o estado de Roraima, no Brasil, e o distrito de Rupununi, na República Cooperativa da Guiana (ver Figure 2.1). O rifte apresenta-se alongado na direção NE-SO, com cerca de 300km de comprimento e 30km a 50km de largura.

Os limites nordeste e sudoeste do gráben são os afloramentos do basalto das Colinas Toucan, na Guiana, e a Serra de Nova Olinda, no Brasil, respectivamente com contato discordante com as rochas metamórfica do embasamento (Grupo Kanuku). O limite sudeste são as grandes falhas normais de Lethem e do Kanuku, esta última margeando o sopé das montanhas de rochas metamórficas Kanuku, na Guiana. O limite noroeste são as falhas normais do Surumu e do Maú, esta segunda beirando os sopés da serra metavulcânica de Pacaraima e da montanha granítica Makarapan, na Guiana.

A topografía monótona do interior do gráben só é quebrada pela Serra do Tucano, um conjunto de morros suaves formados pela erosão diferencial de remanescentes arenosos da Formação Tucano, preservados em baixos estruturais, como o sinclinal homônimo.

O cenário estrutural da bacia do Tacutu caracteriza-se por horsts, grabens, anticlinais, sinclinais, estrutura em flor, e inversão de mergulho (rollovers). Falhas transcorrentes são consideradas como sendo reativações que se desenvolveram em estágios de rifte.

O cenário estratigráfico da bacia do Tacutu divide-se em quatro sequências deposicionais que refletem a evolução geológica da área. A primeira sequência basal é

representada por formações vulcânicas Apoteri e por formações de folhelho Manari, ambas relacionadas à fase pré-rifte. A segunda seqüência é representada pela formação evaporítica Pirara, e relacionada ao estágio de máxima tensão na fase rifte.

A terceira sequência é representada por arenitos e conglomerados das formações Tacutu e Tucano, e interpretada por corresponder ao contínuo decréscimo de tensão. A quarta sequência é representada por lateritos e aluviões das formações Boa Vista e Savanas do Norte e é interpretado como corresponder à continua diminuição do alongamento do graben.

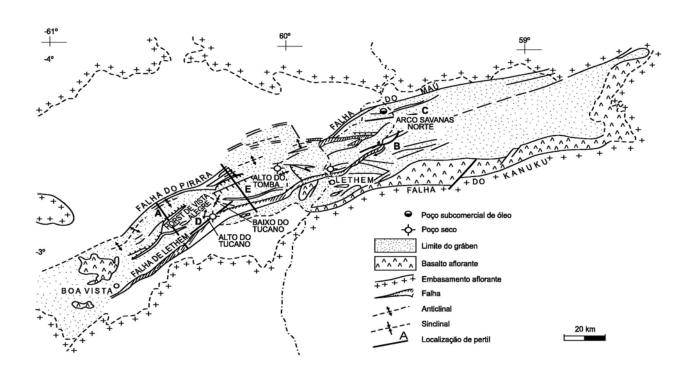


Figura 2.1. Mapa estrutural do graben do Tacutu mostrando a direção de algumas linhas sísmicas. Fonte: Eiras e Kinoshita (1990).

Os geólogos descrevem as bacias sedimentares estratigraficamente, e os geofísicos as modelam matematicamente, ambos objetivando a exploração sísmica. As sequências geológicas são classificadas de muitas formas, como por exemplo, em periódica, quase-periódica, aleatórias, especiais, progressivas, regressivas, etc., substanciando uma descrição geral das suas assinaturas sísmicas. Os fenômenos físicos esperados nestes meios são descritos como devido a filmes, ou a estratificação fina (ZIOLKOWSKI; FOKKEMA, 1986).

# 3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO SÍSMICO

Neste capítulo descrevemos alguns conceitos básicos de fundamental importância para o entendimento do método sísmico e dos processos aplicados a dados sísmicos reais. Entre estes conceitos podemos destacar os arranjos contidos no cubo de dados, o modelo convolucional e a teoria do raio de ordem zero. Além disso, pretendemos aqui mostrar a seqüência natural da evolução da complexidade presente nos modelos sísmicos, que vai desde o caso de camadas com interfaces plano-horizontais a interfaces curvas.

Nesta dissertação os modelos sísmicos para simulação e obtenção de resultados, com a finalidade de estudar condições de risco exploratório de petróleo (gás e óleo) são baseados na descrição geológica existente de alguns autores a respeito do Graben do Tacutu. A geologia foi resumida no capítulo 2, e neste traduzimos o modelo geológico para o modelo físico de propagação de ondas elásticas e o arranjo de coleta de dados.

A descrição do método sísmico está diretamente ligada ao conjunto: fonte, meio e receptor. Consequentemente, um conceito que deve ser sempre estabelecido nas descrições é quanto às dimensões da fonte, do meio e do levantamento; se 1D, 1.5D, 2D, 2.5D ou 3D. Basicamente, o problema geofísico é 3D; porém, por conveniência e praticidade, são feitas aproximações 2D e 2.5D.

# 3.1 CONFIGURAÇÕES

A configuração original de aquisição de dados sísmicos de reflexão é a fonte-comum (FC) (Figura 3.1), a qual compõe o cubo de dados de multicobertura. A configuração FC estabelece a discretização original temporal-espacial dos dados, e como exemplo típico dos dados do Tacutu, é de 4 ms e 50 m, respectivamente.

Diferentes arranjos podem ser organizados a partir do cubo de dados, como por exemplo, os arranjos ponto-médio-comum (PMC) e receptor-comum (RC). Nestas novas configurações as propriedades da discretização mudam com relação à coordenada espacial. Surgem ainda, mudanças na escala temporal com o processamento, como por exemplo, no empilhamento.

A primeira tarefa do programa de levantamento sísmico contínuo 2D consiste no traçado da linha de campo sobre o mapa geológico de superfície da região e estabelecer a origem das coordenadas UTM. A linha deve obedecer à direção geral do mergulho das camadas (ou ser perpendicular à direção geral das estruturas). Em segundo lugar, definir a seqüência das posições dos pontos de tiro e das estações receptoras situadas ao longo da linha projetada (conjunto de sensores em linha). O conjunto de registros (traços) é obtido através das estações de geofones quando o registro é terrestre, ou de hidrofones quando o registro é marinho.

A fonte sísmica explosiva é sempre do tipo 3D, pontual no espaço e não-pontual no tempo (SHARPE, 1941), e a sua posição marca o ponto de referência do sistema de coordenadas para a seção FC. O conjunto de traços sísmicos registrados em FC (ou seção temporal FC) pertence a um experimento; ou seja, a um evento de explosão que gera uma onda sísmica que se propaga na subsuperfície com uma transmissividade e uma refletividade. A seção FC contém traços que estão organizados de acordo com o aumento do afastamento, ou meio-afastamento, para a direita e para a esquerda.

A fonte sísmica gera nos meios geológicos uma complexidade de ondas que podemos classificar de forma simples em: ondas de volume e ondas de superfície. Para as aplicações sísmicas, as ondas de superfície são filtradas com filtros de velocidade. O presente estudo trata exclusivamente da utilização das ondas de volume, e em particular as ondas compressionais (ondas P).

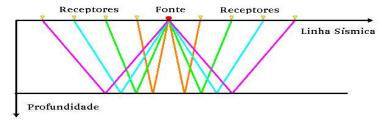


Figura 3.1. Ilustração da configuração FC (fonte-comum) com um arranjo unilateral utilizada na aquisição de dados de reflexão, onde todos os raios partem do mesmo ponto espacial. Como regra geral, o ângulo de incidência formado com a vertical deve medir menos que 20° no método da reflexão sísmica, que nesta condição não permite muita conversão P-SV.

No fenômeno de propagação de ondas de volume, o interesse é na transmissividade e na refletividade através das interfaces na subsuperficie. As ondas refletidas e refratadas que emergem nos receptores são registradas com relação ao tempo transcorrido com relação à fonte

de emissão de energia sísmica; ou seja, o tempo de trânsito. No levantamento 2D, a configuração FC é deslocada continuamente ao longo da linha sísmica programada para obter as várias seções FC que contêm eventos redundantes dos mesmos pontos refletores na subsuperfície iluminada. O conjunto de dados registrados forma o cubo de dados de multi-cobertura que contém uma certa redundância na cobertura de pontos (ou segmentos de superfície) em profundidade.

Os rearranjos dos traços registrados formam outras seções que podem ser mais convenientes estatisticamente para a interpretação dos dados registrados. Uma das formas é a redistribuição dos traços em seção afastamento-comum (AC) Figura 3.2, ou em seção ponto-médio-comum (PMC) Figura 3.4. Uma seção AC contém todos os traços com um certo afastamento fixo, sendo referidos pela coordenada do ponto médio (Figura 3.2).

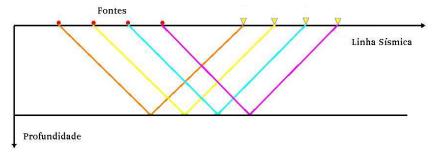


Figura 3.2. Ilustração da configuração AC (afastamento-comum) caracterizada pela distância fonte-receptor constante.

Uma seção especial e desejável de AC é a seção afastamento-nulo (AN), o que quer dizer que o (meio-) afastamento é zero; isto é, as posições da fonte e receptor são coincidentes (Figura 3.3). Porém a configuração AN não pode ser realizada durante a aquisição sísmica de reflexão sendo objeto de simulação por métodos de empilhamento.

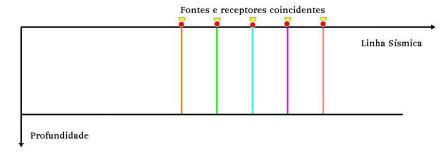


Figura 3.3. Ilustração da configuração AN (afastamento-nulo) onde a distância fonte-receptor é zero. Considerando o tempo-simples, esta seção é interpretada como "refletor em explosão" em interface plano-horizontal, e que equivale à onda hipotética denominada de Onda Normal (onda-N).

A seção ponto médio comum (PMC) Figura 3.4 é composta por todos os traços laterais à esquerda e à direita do ponto médio entre a fonte e o receptor, e os incrementos laterais são de meio-afastamento. A seção PMC pode coincidir com a seção ponto comum em profundidade (PCP) Figura 3.5, apenas para o caso de interfaces plano-horizontais, uma vez que a coordenadas horizontais do PMC e do PCP são as mesmas. No caso em que os refletores não forem horizontais não existe um ponto, mas uma área de reflexão em subsuperfície (superfície de reflexão comum).

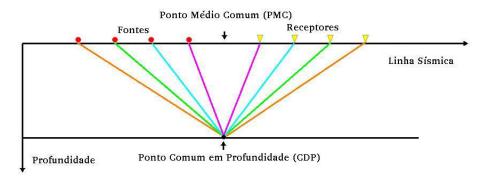


Figura 3.4. Ilustração da simetria da configuração ponto-médio-comum (PMC) com o ponto-comum-emprofundidade (PCP), mostrando a iluminação pontual em subsuperfície. Os receptores estão à direita e correspondem às fontes à esquerda, e o caso contrário também é possível.

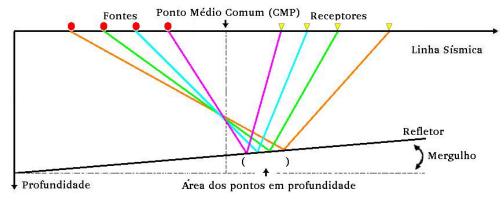


Figura 3.5. Ilustração da configuração PMC para um refletor plano-inclinado. Neste caso, não existe um PCP para coincidir com o PMC devido à inclinação do refletor, estando a iluminação distribuída numa área (superfície de reflexão comum). Os receptores à direita correspondem às fontes à esquerda, e viceversa.

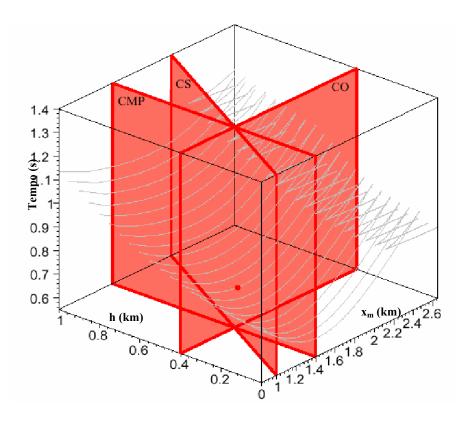


Figura 3.6. Cubo de dados de multicobertura onde estão ilustrados os arranjos afastamento-comum (AC = CO), fonte-comum (FC = CS) e ponto-médio-comum (PMC = CMP). Este cubo serve para ilustrar a direção dos arranjos. As relações matemáticas entre as coordenadas são:  $h = (x_G - x_S)/2$ ,  $x_m = (x_G + x_S)/2$ . Em que  $x_G$  é coordenada do receptor;  $x_S$  é a coordenada da fonte;  $x_m$  é a coordenada do ponto-médio-comum; e h é o meio-afastamento. A representação matemática do seu conteúdo dos traços é expressa por  $T(x_m,h)$ .

As quatro configurações mencionadas acima estão contidas no cubo de dados 3D. A Figura 3.6 mostra os planos pertencentes às seções FC, AC e PMC representadas por planos de cor vermelha. Na seção FC a relação aplicável é  $x_m - h = \text{constante}$ , sendo constituída por um painel que forma um ângulo de 45 graus no plano  $(x_m, h)$ . Na seção PMC a relação aplicável é  $x_m = \text{constante}$  e h = variável, sendo constituída por um painel paralelo ao eixo h no plano  $(x_m, h)$ . Na seção AC a relação aplicável é h = constante, sendo constituída por um painel paralelo ao eixo  $x_m$  no plano  $(x_m, h)$ . O caso especial da seção AN é o plano frontal à direita do cubo de dados em que h = 0.

#### 3.2 RESOLUÇÃO TEMPO-ESPACIAL

Esta seção trata de conceitos relevantes ao problema de resolução tempo-espacial na sísmica de reflexão, com o objetivo de conceituar os efeitos da discretização do campo de onda pela amostragem temporal nos canais de registro eletrônico-digital, pelos parâmetros geométricos do levantamento (espaçamento fonte-receptor), e pela seleção posterior no cubo de cobertura múltipla para obter outras configurações, como a PMC. Estes efeitos devem permanecer em foco para determinar as formas de incorporação às janelas do processamento voltado à inversão em estudo. A literatura básica para esta análise é, entre outros, Vermeer (1999) quanto à amostragem tempo-espacial, Ziolkowski e Fokkema (1986), Sheriff e Geldart (1982) quanto à resolução vertical e Hubral et al. (1993) quanto à resolução horizontal.

#### 3.2.1 Teorema Wittaker-Shannon-Koltenikov

A amostragem monocanal está relacionada ao teorema Wittaker-Shannon-Koltenikov (WSK) na forma unidimensional e uniforme. Para o caso *n*-dimensional generalizado, como formulado em Peterson e Middleton (1962), o teorema estabelece que a malha de amostragem mais eficiente (ou seja, que necessita de uma quantidade mínima de pontos amostrados por hipervolume) não é geralmente a malha retangular.

Em uma dimensão, a primeira parte do teorema WSK é que se uma função s(t) não contém frequências maiores do que  $\omega_M$ , então s(t) pode ser completamente determinada por seus valores em intervalos uniformes,  $\Delta t$ , menores do que  $1/2f_M$ . A função s(t) é de espectro limitado se:

$$S(\omega) = 0, (|\omega| > \omega_M = 2\pi f_M). \tag{3.1}$$

A segunda parte do teorema como uma função bandeada g(t), amostrada no maior intervalo de tempo permitido  $\Delta t = 1/2 f_N$  para que não haja alias , é que ele pode ser interpolada segundo a expressão:

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_s(n\Delta t) \frac{\operatorname{sen}[\omega_N(t - n\Delta t)]}{\omega_N(t - n\Delta t)}.$$
(3.2)

A continuidade desta análise no domínio tempo-espaço é naturalmente conduzida no domínio da freqüência (domínio da transformada de Fourier); ou seja, no domínio da freqüência espacial-

espacial  $(k_s, k_r)$ . Para isto temos a Figura 3.7 que apresenta o bi-espectro relacionado às configurações anteriores.

Se o espectro bi-dimensional for zero fora do quadrado, então a amostragem quadrada como descrita para  $(x_s, x_r)$  na Figura 3.7 é eficiente. Porém, se o espectro bi-dimensional for zero fora do paralelogramo, então a amostragem oblíqua como descrito para  $(x_m, x_0)$  é eficiente. Consequentemente, o caminho mais eficiente para amostrar corretamente no sistema  $(x_m, x_0)$  é a amostragem quadrada das fontes e receptores.

Considerando a segunda parte do teorema WSK, a reconstrução de qualquer ponto em  $(x_m, x_0)$  é possível usando o procedimento de interpolação bidimensional.

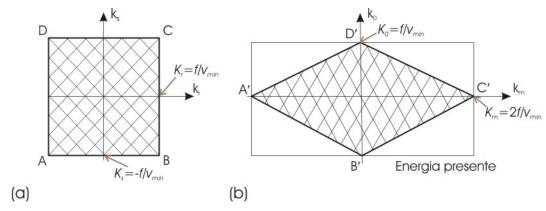


Figura 3.7. Regiões com e sem energia a partir de um painel de bi-freqüência. (a) Energia em  $(k_s, k_r)$  é limitado pelas linhas  $k_{s,r} = \pm f/V_{\min}$ . (b) Energia em  $(k_m, k_o)$  não é limitada pelas linhas  $k_m = \pm 2f/V_{\min}$  e  $k_0 = f/V_{\min}$ , mas pelo mapeamento em forma de losango da área hachurada, uma vez que a velocidade aparente ao longo de  $x_m$ ,  $v_m$ , é igual a  $v_r/2$ .

#### 3.2.2 Amostragem e resolução temporal

Seguindo Vermeer (1999), a resolução temporal tem dois aspectos práticos. No primeiro, o modelo convolucional é conveniente para descrever um sismograma, e a transformação do domínio do tempo para o da freqüência, numa posição espacial qualquer, é expressa por:

$$S(\omega) = M(\omega)P(\omega)R(\omega) + N(\omega). \tag{3.3}$$

Este processo em cascata mostra a necessidade de ressonância entre as três partes envolvidas: a fonte  $[P(\omega)]$ , o meio  $[M(\omega)]$  e o receptor  $[R(\omega)]$ , analisado através da resposta em freqüência de cada componente, sendo adicionado uma componente ruído,  $N(\omega)$  (KNAPP; STEEPLES, 1986).

A amostragem temporal do traço para o processamento é o resultado do sistema eletrônico que procura simular a amostragem matemática. Esta amostragem é, por exemplo, da ordem de 2 ms sobre um traço de 3000 ms. O efeito da amostragem matemática uniforme sobre um é descrito pelo teorema Wittaker-Shannon-Koltenikov em uma dimensão, que define a freqüência máxima resolvível denominada de freqüência Nyquist, e expressa em 1D por:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t}, [Hz]. \tag{3.4}$$

O valor de referência corresponde a 125Hz para  $\Delta t = 4 \text{ ms.Os}$  sensores sísmicos têm, normalmente, uma frequência natural de 10 Hz, são amortecidos quase que criticamente, eles têm um corte abrupto nas baixas frequências, e uma resposta estável nas frequências altas. Além disso, o sistema sismográfico é construído com um filtro anti-álias (tipo passa-baixa) embutido (Figura 3.8).

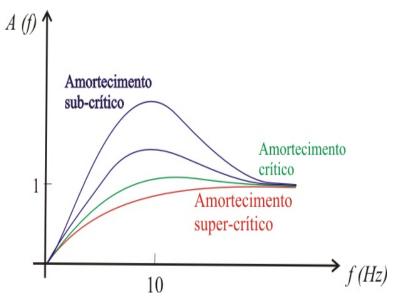


Figura 3.8. Ilustração da resposta receptor (transdutor eletromagnético) com os amortecimentos subcrítico, crítico e supercrítico.

#### 3.2.3 Amostragem e resolução espacial

A partir da descrição da geometria de tiro da Figura 3.9, é importante o entendimento da relação entre a configuração de tiro com os dois sistemas de coordenadas  $(t, x_s, x_r)$  e  $(t, x_m, x_0)$ . O exemplo da Figura 3.9 (parte superior) é uma geometria de tiros unilaterais com espaçamento uniforme onde cada ponto representa um traço sísmico com tiro em  $x = x_s$  e a estação receptora em  $x = x_r$ . Na parte central da figura, as posições do tiro e do receptor são indicadas ao longo da linha sísmica com coordenada x. Para simplificação, somente 11 tiros com 8 receptores foram considerados. O espaçamento entre as fontes é o mesmo entre os receptores  $\Delta x_s = \Delta x_r$ . Na parte inferior, a configuração de tiro é mostrada no sistema de coordenadas  $(x_m, x_0)$ . A parte superior da Figura 3.9 é chamada de diagrama de superfície, e a parte inferior como diagrama de subsuperfície (TANER; KOEHLER; ALHILALI, 1974).

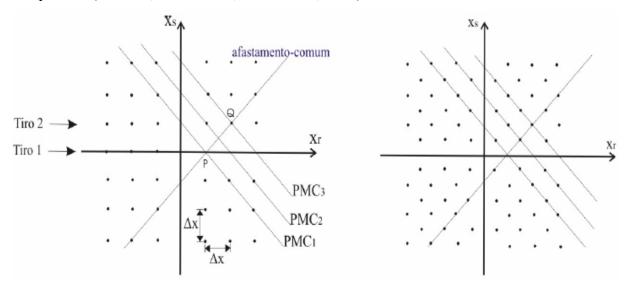


Figura 3.9. Ilustração do paradoxo da amostragem. Cada ponto representa um traço em (xs, xr). (esquerda) Amostragem "correta" em (xs, xr) conduz a uma baixa amostragem em (xm, x0). A linha PMC2 não é representada no painel de afastamento definido por P e Q. (direita) A amostragem básica em (xm, x0) requer o dobro de fontes com receptores entre as posições originais.

É comum considerar, os intervalos de amostragem fonte-receptor iguais a um intervalo básico  $\Delta x$ . Os pontos em  $(x_s, x_r)$  são plotados com as distâncias igual ao intervalo básico de amostragem:  $\Delta x_s = \Delta x_r = \Delta x$ . De acordo com a Figura 3.9, cada ponto em  $(x_s, x_r)$  representa um traço com a fonte em  $x = x_s$  e receptor em  $x = x_r$ . Para dois pontos P e Q adjacentes ao longo da

trajetória de afastamento-fixo, o traço em P é registrado com a fonte  $S_1$  em  $x_s = 0$ , e o traço em Q é registrado com a fonte  $S_2$  em  $x_s = \Delta x$ .

No sistema  $(x_s, x_r)$ , temos  $P = (0, \Delta x)$  e  $Q = (\Delta x, 2\Delta x)$ , enquanto que no sistema  $(x_m, x_0)$  temos  $P = (\Delta x/2, -\Delta x)$  e  $Q = (3\Delta x/2, -\Delta x)$ , o que mostra que os pontos adjacentes na linha de AC ficam a uma distância  $3\Delta x/2 - \Delta x/2 = \Delta x$  que é duas vezes maior do que o intervalo de amostragem básico  $\Delta x_m$  ao longo de  $x_m$ . O mesmo se aplica aos pontos no PMC; o intervalo entre traços com o mesmo  $x_m$  é duas vezes maior em relação ao afastamento o qual faz intervalo de amostragem  $\Delta x_0$ . Assim, parece que existe um paradoxo na amostragem: enquanto o campo de onda contínuo é amostrado "corretamente" em  $(x_s, x_r)$ ; ou seja, enquanto que em qualquer ponto  $(x_s, x_r)$  o valor do campo de onda pode ser reconstruído usando os pontos amostrados, ele é subamostrado no domínio  $(x_m, x_0)$ . Conseqüentemente, seria necessário o dobro de traços para alcançar a amostragem "correta" em  $(x_m, x_0)$ . A amostragem "correta" em  $(x_m, x_0)$  poderia ser alcançada diminuindo pela metade o intervalo da fonte. Com isto, fontes alternadas seriam registradas com posições do receptor alternado.

Seguindo Sheriff e Geldart (1982), o termo resolução é referido à separação mínima necessária entre dois eventos semelhantes para visualizar a separação entre eles, em vez de visualizar um evento único. Em relação às ondas sísmicas, podemos distinguir duas situações: (i) resolução vertical (no espaço ou no tempo) entre duas interfaces que devem ser mostradas como refletores individuais, ou (ii) resolução horizontal para dois eventos envolvendo uma única interface, cuja distância entre eles deva ser suficiente para mostrar eventos individuais.

Um conceito simples e direto é considerar hipoteticamente um pulso sísmico extremamente concentrado onde a resolução não seria um problema, porém os pulsos sísmicos reais envolvem uma faixa limitada de frequências. Para uma onda plana vertical monocromática (frequência temporal f) incidente numa camada plana horizontal de espessura  $\Delta z$ , a reflexão da interface inferior é retardada por ( $\Delta t = 2\Delta z/\lambda f$ ) em relação à superfície superior, ou então medida como frações do comprimento de onda. Pode-se dizer que existem duas ondas, quando a chegada da segunda onda causa uma mudança perceptível com relação à chegada da primeira onda.

O limite de resolução é definido como sendo a condição de dois eventos serem separados por um meio-ciclo (T/2), de forma que os efeitos de interferência sejam maximizados, sendo que a interferência pode ser construtiva ou destrutiva. A espessura da camada fina é

indicada como fração do comprimento de onda. A forma da onda claramente indica mais que um refletor quando a espessura da camada excede  $(1/4)\lambda$ , onde a amplitude é máxima devido à interferência construtiva. A camada ainda produz uma reflexão significante quando a espessura está além do limite de resolução. Uma camada com  $\lambda/20$  a  $\lambda/30$  em espessura é detectável, através da reflexão da interface superior, embora sua espessura não possa ser determinada a partir da forma de onda.

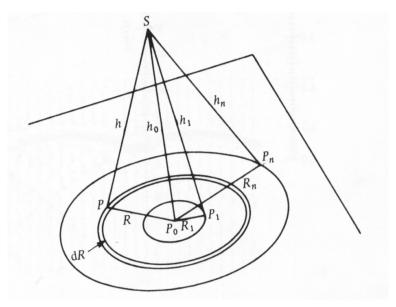


Figura 3.10. Definição geométrica da ZF no espaço. A fonte e o receptor estão localizados no mesmo ponto S.  $h_0$  é a distância vertical ao refletor.  $R_n$  são os raios das ZF, medidas a partir do ponto  $P_0$ , dR é o infinitesimal do raio.

A resolução horizontal é baseada no conceito de Zona de Fresnel (ZF) como esboçado na Figura 3.10. Nesta figura, a fonte e o receptor são coincidentes em S,  $SP_0$  é perpendicular ao plano refletor, e os raios  $R_1$ ,  $R_2$ , ...  $R_n$  são tal que as distâncias  $SP_0$ ,  $SP_1$ , ... ,  $SP_n$  diferem entre si de  $\lambda/4$ , em que  $\lambda=vt$ , sendo v a velocidade e T o período temporal da onda,  $\lambda$  o comprimento de onda e n é o índice da ZF. Desta forma,  $h_{n+1}-h_n=\lambda/4$ . Para a condição  $h_n>>R_n>>\lambda$ , é demonstrado que:

$$R_n \approx \left(\frac{1}{2}n\lambda\lambda_0\right)^{1/2} \quad e \quad \Delta L \approx \pi \lambda h_0 \left(n - \frac{1}{2}\right),$$
 (3.5)

em que  $\Delta L$  é a área para cada ZF (BURNETT; HIRSCHBERG; MARK, 1958).

#### 3.3 MODELO CONVOLUCIONAL

O modelo convolucional é fundamental para entendermos o conteúdo de um traço sísmico, e encontra o seu respaldo na solução geral da equação de onda e na teoria da comunicação. Inicialmente é estabelecido que apenas a componente campo-distante será utilizada. Em segundo lugar, que o deslocamento registrado no sensor é proporcional ao deslocamento da partícula do solo, ou da velocidade do solo, ou ainda da velocidade da partícula na fonte (AKI; RICHARDS, 1980).

Para o presente estudo, o modelo simples e conveniente, necessário para entender e descrever um traço sísmico é definido como a integral da convolução dependente do parâmetro horizontal do raio, *p*, na forma:

$$g(t,p) = w(t) * \varepsilon(t,p) + r(t) = s(t,p) + r(t),$$
 (3.6)

em que w(t) representa o pulso-fonte efetivo,  $\varepsilon(t,p)$  é a função refletividade, s(t,p) é a função sinal-mensagem e r(t) é o ruído aditivo não contabilizado em  $\varepsilon(t,p)$  e em w(t).

Com o objetivo de completar a descrição, o pulso-fonte efetivo, w(t), pode ser descrito por várias componentes ao longo da sua trajetória na forma:

$$w(t) = w_O(t) * w_F(t) * w_A(t) * w_I(t) * w_E(t).$$
(3.7)

Nesta equação estão representados os efeitos do pulso-fonte original  $w_O(t)$  (assinatura da fonte), de múltiplas (fantasmas, não previstas na refletividade)  $w_F(t)$ , de atenuação inelástica  $w_A(t)$ , do instrumento de registro  $w_I(t)$ , e de divergência esférica  $w_E(t)$  (Figura 3.11). As componentes tempo-variantes são  $w_O(t)$ ,  $w_F(t)$  e  $w_I(t)$ , e as componentes tempo-invariantes são  $w_A(t)$  e  $w_E(t)$ . As componentes  $w_F(t)$ ,  $w_A(t)$  e  $w_E(t)$  são consideradas físicamente de fase-mínima, e as componentes  $w_O(t)$  e  $w_I(t)$  não são necessariamente de fase-mínima. Todas estas componentes podem ser analisadas individualmente como filtros específicos.

Para os métodos de deconvolução que se baseiam nos princípios de fase-mínima e de tempo-invariante, as componentes consideradas como fontes potenciais de distorção de fase são, portanto,  $w_A(t)$ ,  $w_E(t)$ ,  $w_O(t)$  e  $w_I(t)$ . Todas estas componentes do pulso podem ser teoricamente submetidas a seus correspondentes operadores inversos  $[w_A^{-1}(t), w_F^{-1}(t), w_I^{-1}(t)]$  e  $w_E^{-1}(t)$ , embora não seja uma tarefa simples.

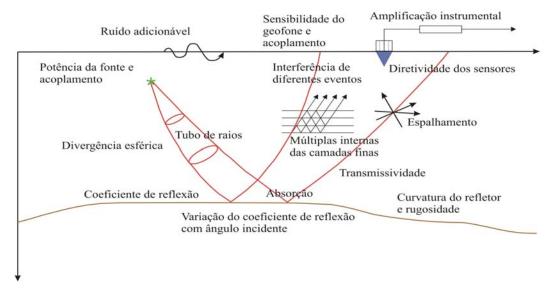


Figura 3.11. Fatores físicos que influenciam as amplitudes das ondas sísmicas.

Fonte: Desenhado a partir de Sheriff, 1975.

O ruído pode ser descrito por uma componente ambiental [com uma parte aleatória,  $r_{\rm aa}(t)$ , e uma parte coerente,  $r_{\rm ac}(t)$ ], e por uma componente relacionada à fonte sísmica [com uma parte aleatória,  $r_{\rm fa}(t)$ , e uma parte coerente,  $r_{\rm fc}(t)$ ] que são submetidas à convolução com pulsos filtrantes na forma:

$$r(t) = p_{va}(t) * [r_{aa}(t) + r_{ac}(t)] + p_{vf}(t) * [r_{fa}(t) + r_{fc}(t)].$$
(3.8)

em que a componente filtrante mais efetiva em  $p_{va}(t)$  e  $p_{vf}(t)$  é o instrumento (sensor).

Como descrever e o que fazer com a componente ruído não é uma tarefa simples (OLHOVIC, 1964 e SCALES; SNIEDER, 1998). No entanto, uma descrição conveniente da componente ruído é a de ruído branco definido através da autocorrelação estocástica (uma vez que usamos o critério de processo aleatório para descrever o ruído) na forma hipotética dada por:

$$\phi_{rr}(t) = E\{r(t), r(\tau)\} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} r(\tau) r(\tau - t) d\tau , \qquad (3.9)$$

que, por definição, para um ruído branco tem a forma a definição é:

$$\varphi_{rr}(t) = \sigma_r^2 \delta(t) . \tag{3.10}$$

em que  $\delta(t)$  é o delta de Dirac e  $\sigma_r^2$  é a variância do ruído. Esta definição permite obter uma expressão espectral correspondente ao ruído branco a qual é dada por uma constante:

$$\Phi_{rr}(f) = \sigma_r^2 \,. \tag{3.11}$$

# 3.4 EQUAÇÃO DE ONDA E MODELOS

A teoria clássica da elastodinâmica é constituída das leis naturais de propagação de ondas elásticas. A equação do movimento da partícula  $[\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)]$  da onda elástica em termos das componentes de deslocamento é escrita na forma:

$$\rho \ddot{u}_i = \mu \nabla^2 u_i + (\lambda + \mu) \nabla_i (\nabla \cdot \vec{u}). \tag{3.12}$$

A solução da equação de onda depende diretamente do modelo geométrico e das condições físicas impostas ao problema, como por exemplo, camadas planas, meios complexos, alta freqüência, homogeneidade, isotropia e dimensões da fonte, do meio e do registro.

A decomposição de Helmholtz levam a equação de onda elástica para as formas de potenciais de deslocamentos  $[\phi = \phi(x, y, z, t)]$ , e para uma forma semelhante na propagação acústica [a pressão P = P(x, y, z, t) substitui  $\phi = \phi(x, y, z, t)$ ]:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \phi \,. \tag{3.13}$$

Uma proposta para separar o efeito espacial do temporal é baseada na teoria do raio que é uma aproximação de alta frequência para a equação de onda a partir da relação tensão-deslocamento. A expressão para o deslocamento  $u_i(x,t)$  é escrita na forma complexa como:

$$u_i(x,t) = U_i(x)e^{i\omega\tau(x)}. \tag{3.14}$$

Nesta equação  $\omega$  representa a frequência angular, t o tempo e x a posição. Para o caso de  $\omega$  grande obtém-se a solução denominada de alta frequência.  $U_i(x)$  representa a amplitude vetorial. A quantidade real  $\tau$  é denominada de iconal, ou função fase.  $U_i$  e  $\tau$  dependem das coordenadas espaciais ( $\omega$  é independente). A superfície na qual  $\tau$  é constante,  $\tau$  (x)= $t_0$  representa a frente de onda para um tempo específico  $t_0$  (CERVENY, 1985 e CERVENY; MOLOTKOV; PSENCIK, 1977).

A solução proposta leva à equação iconal (para o cálculo do tempo de trânsito) e a equação de transporte (para o cálculo da amplitude). Um método admite a expressão para  $u_i$  na forma série de raios:

$$u_{i} = \sum_{n=0}^{\infty} u_{i}^{n} (-i\omega)^{-n}, \qquad (3.15)$$

a partir da qual se seleciona o tempo de ordem zero (n=0) por ser mais conveniente, enquanto ordens superiores (n>0) servem para outras investigações.

São necessárias argumentações para organizar o modelo, como aproximações matemáticas de conseqüência para que  $\tau$  ( $\underline{x}$ ) satisfaça uma equação do tipo iconal, e para que raios possam ser introduzidos (AKI; RICHARDS, 1980). Segundo o clássico Cerveny (1985), a solução geométrica geral em meios inomogêneos para ondas compressionais, em termos de coordenadas de raios para a componente longitudinal, com uma forma fisicamente conveniente, é dada por:

$$u_{i}(x,t) = \left(\frac{1}{\rho(x)v(x)}\right)^{1/2} \frac{1}{L(x)} F(\underline{0}) U[t-\tau(x)]. \tag{3.16}$$

em que L(x) representa o fator de espalhamento geométrico, F(x=0) representa o padrão de radiação da fonte localizada na origem ( $\xi=0$ ),  $\rho$  é a densidade, v é velocidade e  $\tau$  (x) satisfaz a integral ao longo do raio:

$$\tau (x) = \int_{\xi}^{x} \frac{|ds|}{v(x)}.$$
 (3.17)

O meio mais simples conhecido é o verticalmente heterogêneo. Mesmo assim múltiplos eventos sísmicos se propagam na subsuperfície, e a identificação de alguns eventos na superfície é realizada pelas propriedades cinemáticas, enquanto outros eventos são identificados pelas propriedades dinâmicas. Em consequência disto, os atributos da frente de onda deve incluir parâmetros cinemáticos e parâmetros dinâmicos das ondas sísmicas.

## 3.4.1 Modelo de camadas com interfaces plano-horizontais

Este modelo, composto das trajetórias de refração e reflexão de multicamadas, é muito importante para entender a seção sísmica voltada à exploração de hidrocarbonetos, que é essencialmente realizada num arranjo FC de cone estreito (ângulo < 20°). Nesta condição e como a fonte explosiva produz essencialmente ondas compressionais (ondas P), o fenômeno da reflexão sísmica não permite muita conversão P-SV (AKI; RICHARDS, 1980). A Figura 3.12 corresponde a uma seção FC do Tacutu selecionada para servir de demonstração da utilidade do modelo de multi-camadas com interfaces plano-horizontais.

Para o modelo clássico formado de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas, com uma fonte pontual esfericamente simétrica, afastamento-nulo), o espalhamento de energia obedece uma descrição dependente do tempo-duplo de trânsito vertical  $t_i$  de cada camada i. O tempo duplo de propagação, T(p), é dado por:

$$T(p=0) = 2\sum_{i=1}^{N} \frac{z_i}{v_i}.$$
 (3.18)

O raio da frente de onda é dado por:

$$R_0(x=0) = \frac{1}{v_0} \sum_{i=1}^{N} t_i v_i^2, \quad [L].$$
 (3.19)

Nesta equação, x é a distância horizontal fonte-sensor,  $v_i$  é a velocidade e  $z_i$  a espessura relativas à camada i (NEWMAN, 1973).

O próximo modelo estende ao afastamento arbitrário, e o tempo-duplo, T(p), e o afastamento, X(p), são dados em função do parâmetro horizontal do raio (p) de forma independente; isto é, T(p) não é escrito em termos de X(p):

$$T(p) = 2\sum_{i=1}^{k} \frac{\Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}};$$
(3.20a)

$$X(p) = 2\sum_{i=1}^{k} \frac{v_i^2 p \Delta t_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}.$$
 (3.20b)

sendo  $p = \text{sen}(\theta_0/v_1)$ , a vagarosidade ou o parâmetro do raio,  $\theta_0$ , o ângulo de partida,  $\theta \le |\pi/2|$  e  $\Delta t_i$ , o tempo de trânsito vertical na camada.

O atributo básico da frente de onda, resumido como o raio de curvatura, é dado por Newman (1973) (Figura 3.13):

$$R_0(x) = \frac{\sqrt{1 - p^2 v_1^2}}{p v_1} \left[ x^2 + 2x \sum_{i=1}^k z_i \left( \frac{p v_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}} \right)^3 \right]^{1/2}.$$
 (3.21)

Com os dois modelos (3.20) e (3.21), e um pulso-fonte efetivo teórico, sismogramas simples podem ser construídos considerando o modelo da convolução simples para comparação com dados reais.

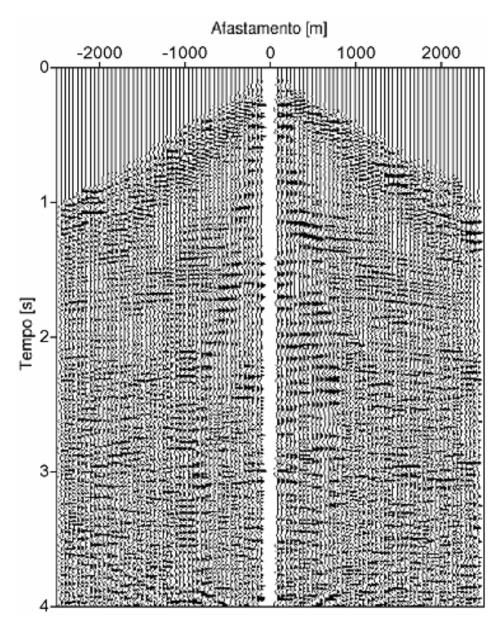


Figura 3.12. Exemplo de seção FC para mostrar o comportamento dos eventos, onde são observadas reflexões com forma hiperbólica/parabólica, e que se pode modelar por camadas plano-horizontais como primeira aproximação. As ondas de superfície foram atenuadas com o filtro f-k.

O prático é escrever a equação temporal em função do afastamento, i.e.: T = T(x). Neste caso, a correção ao afastamento-nulo utiliza a trajetória expressa pela lei hiperbólica que relaciona diretamente ao afastamento fonte-receptor X(p) = x (SHERIFF; GELDART, 1985) segundo a equação:

$$T^{2}(x) = T_{0}^{2} + \frac{x^{2}}{v_{rms}^{2}}.$$
 (3.22)

em que  $v_{rms}$  é a velocidade quadrática-média para camadas horizontais que pode ser dada em função do raio de curvatura  $R_0$ :

$$v_{rms} = \left[ \frac{v_1 R_0}{T_0} \right]^{1/2}, \tag{3.23}$$

A Figura 3.13 ilustra o caso de camadas planas e os parâmetros envolvidos nas equações acima.

A título de complementação, poderíamos adicionar o conceito da Zona de Fresnel a este caso (HUBRAL et. al., 1993).

A estratégia do empilhamento é mostrada na figura 3.14, onde se observa a trajetória hiperbólica, a janela temporal e espacial.

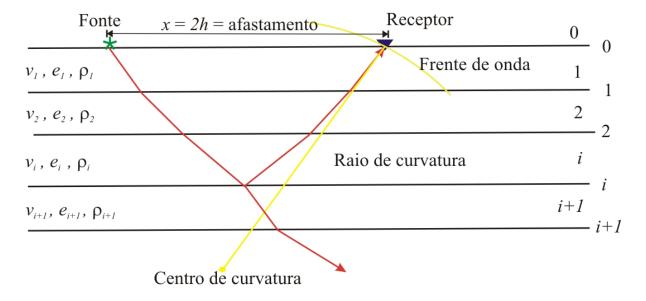


Figura 3.13. Modelo de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas) entre dois semi-espaços (meio 1D). Indicação da numeração das camadas e da geometria da divergência esférica. A simetria é radial.

Para o empilhamento de sobre-tempo normal (NMO), o cubo de dados descrito no capítulo anterior é utilizado para seleção da seção para o empilhamento. O processo de empilhamento significa somar as amplitudes dos traços da seção ao longo de uma trajetória teórica tempo-distância, com o objetivo de obter um único traço, em geral o traço correspondente ao afastamento-nulo.

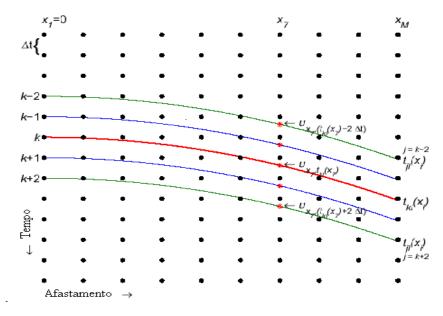


Figura 3.14. Ilustração dos trajetos hiperbólicos e janelas envolvidos no cálculo da função semblance, na correção NMO e no empilhamento NMO.

A trajetória teórica de tempo de empilhamento é obtida com base nos dados e através da análise de coerência (por exemplo, semblance), e a seção simulada é referida a um ponto; por exemplo, o ponto-médio-comum,  $P_0(x_m = x_0)$ .

Utilizando o princípio denominado de similaridade, Neidel e Taner (1971) introduziram o conceito da medida de coerência semblance, cuja expressão é dada por Sguazzero e Vesnaver (1987) e Mauch (1999):

$$S(x_{0}, t_{0}, v_{0}) = \frac{\sum_{t=t_{0}-\delta t/2}^{t_{0}+\delta t/2} \left[ \frac{1}{N_{xh}} \sum_{x=x_{0}-\delta x/2}^{x_{0}+\delta x/2} \sum_{h=h_{0}}^{\delta h} A(x, h, t; v_{0}) \right]^{2}}{\frac{t_{0}+\delta t/2}{\sum_{t=t_{0}-\delta t/2}^{t/2} \frac{1}{N_{xh}} \sum_{x=x_{0}-\delta x/2}^{x_{0}+\delta x/2} \sum_{h=h_{0}}^{\delta h} \left[ A(x, h, t; v_{0}) \right]^{2}};$$

$$(3.24)$$

em que  $A(x_m, h, t; v_0)$  é a amplitude do traço nos pontos da malha na trajetória de empilhamento ao afastamento-nulo, com referência a um ponto  $P_0(x_0,t_0)$  e para uma velocidade  $v_0$ . O somatório externo em t,  $\sum_t$  é uma janela temporal  $(\delta t)$  relativo a pulso efetivo; o somatório  $\sum_h$  é executado na janela espacial do afastamento  $(\delta h)$ ;  $\sum_x$  é na janela espacial do ponto-médio-comum  $(\delta x)$ ,  $N_{xh}$  é o número total de traços envolvidos.

### 3.4.2 Modelo de camadas com interfaces plano-inclinadas

Geologicamente, uma descrição mais coerente para a subsuperfície do que a de camadas plano-horizontais leva a um modelo de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces plano-inclinadas. Isto sem admitir descontinuidades das interfaces, como seria o caso da interpretação de falhas.

Para o modelo clássico formado de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces plano-inclinadas, considerando uma fonte pontual esfericamente simétrica, o espalhamento de energia obedece a uma descrição dependente do tempo-duplo de trânsito de propagação e, entre outros formalismos, podemos adotar (HUBRAL, 1980; DÜRBAUM, 1954), com as equações:

$$T^{2}(x) = \left\{ T(0) + \frac{\operatorname{sen}(\beta_{0})}{v_{1}} (x_{0} - x_{m}) \right\}^{2} + \frac{T(0) \cos^{2}(\beta_{0})}{v_{1} R_{0}} (x_{0} - x_{m})^{2} + \dots;$$
 (3.25)

em que o raio da frente de onda  $R_0$  é dado por

$$R_0 = \frac{2}{v_1} \sum_{j=1}^{N} v_j^2 \Delta t_j \prod_{k=1}^{j-1} \frac{\cos^2(\alpha_k)}{\cos^2(\beta_k)}, \quad \prod_{k=1}^{0} = 1.$$
 (3.26)

Os parâmetros presentes nestas equações estão escritos na Figura 3.15.

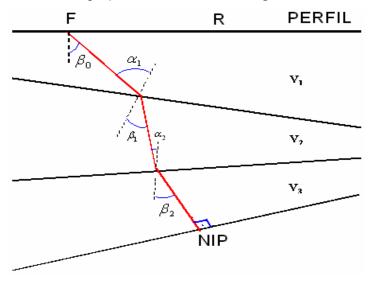


Figura 3.15. Desenho do modelo 2D de camadas homogêneas, isotrópicas com interfaces plano-inclinadas, onde estão representados os parâmetros velocidade  $v_i$ , e os ângulos  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  das equações envolvidas. Este modelo é denominado de iso-velocidades. Cunhas não participam da abertura da observação.

Uma forma comum de escrever a equação do tempo de trânsito para o caso de 1 (uma) interface plano-inclinada com mergulho  $\theta$  é dada por:

$$T(x) = \sqrt{T^2(0) + \frac{x^2 \cos^2 \theta}{v^2}};$$
 (3.27)

onde a velocidade de empilhamento, considerando o caso NMO, é dada por  $v_E = v/\cos\theta$ , e cunhas não participam da janela de experimentação no modelo.

#### 3.4.3 Modelo de camadas com interfaces curvas

Geologicamente, uma descrição ainda mais coerente do que o caso de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces plano-inclinadas leva a um modelo de camadas com interfaces curvas. Num modelo 2D e 2.5D, uma interface pode ser localmente aproximada por uma superfície circular-cilíndrica, ou esférica em 3D. Naturalmente, isto sem admitir descontinuidades verticais na forma de falhas. A teoria paraxial do raio descreve um modelo de interfaces curvas para obter as leis cinemáticas e dinâmicas para as reflexões.

Para o modelo em questão, o método de empilhamento CRS descreve um operador função dos atributos cinemáticos de duas frentes de ondas hipotéticas: a onda Ponto-de-Incidência-Normal (onda NIP), e a onda Refletor-em-Explosão (onda N). A onda NIP se propaga de forma ascendente a partir de uma fonte (pontual em 3D, linha em 2D) localizada num ponto de reflexão do refletor (Figura 3.16). A onda N é ascendente a partir do refletor, e interpretada como uma frente de onda inicial com curvatura igual à curvatura local do refletor.

Considerando que a superfície de medidas seja plana, o operador de empilhamento é descrito por três atributos cinemáticos relacionados às ondas hipotéticas NIP e N e referentes ao raio normal emergente no ponto  $x_m = X_0$ . Eles são o ângulo de emergência ( $\beta_0$ ) da onda observada; a curvatura  $K_{NIP}$  (ou o raio de curvatura  $R_{NIP} = 1/K_{NIP}$ ) da onda NIP, e a curvatura  $K_N$  (ou o raio de curvatura  $K_N$  (ou o raio de curvatura  $K_N$  ) da onda N.

A Figura 3.17 é uma apresentação esquemática do modelo sísmico contendo um refletor curvo  $\Sigma$ , um raio central definido com afastamento fonte-receptor nulo ( $X_0$  R  $X_0$ ) e um raio de

reflexão primaria SR'G. R é o ponto de incidência normal, S é fonte, G é o receptor e  $X_0$  é o ponto de emergência do raio central.

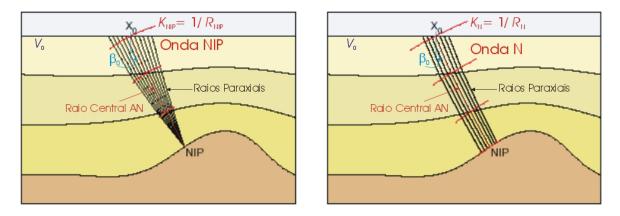


Figura 3.16. Visualização da geometria e física dos parâmetros do operador de empilhamento CRS. O ângulo de emergência do raio central  $\beta_0$ . (esquerda) A curvatura da onda NIP contém informações da distância do ponto de incidência normal ao ponto de observação  $X_0$ . (direita) O raio de curvatura da onda N contém informações da curvatura do refletor.

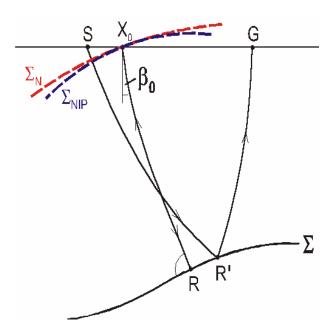


Figura 3.17. Representação geométrica do sistema paraxial com um refletor  $\Sigma$ , um raio central de incidência normal  $X_0$  R  $X_0$ , e um raio paraxial de reflexão primaria S R G. A curva azul representa a frente de onda NIP ( $\Sigma$ NIP), e a curva de cor vermelha representa a frente de onda N ( $\Sigma$ N).

Para um modelo sintético constituído por camadas homogêneas separadas por interfaces curvas, os três atributos cinemáticos ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ ) podem ser calculados pelo traçamento de raio. O traçamento de um raio normal para uma determinada interface serve para determinar  $\beta_0$  na superfície de observação no ponto  $X_0$ . A forma de calcular as curvaturas das frentes de ondas hipotéticas NIP e N é realizada na direção ascendente a partir do ponto de incidência normal sobre o refletor, ao longo do raio normal, levando em consideração a transformação das frentes de ondas (NIP e N) através da lei de transmissão entre as camadas; isto é, a partir do ponto R numa interface até atingir o ponto de observação  $X_0$  (ver Figura 3.17).

Os tempos de trânsito hiperbólico dos raios na vizinhança de um raio central definido são obtidos matematicamente através de uma expansão de segunda ordem em série de Taylor, tendo por base física conceitos paraxiais do raio (SCHLEICHER; TYGEL; HUBRAL, 1993). Em meios 2D, a aproximação do tempo-hiperbólico em função dos atributos cinemáticos das ondas hipotéticas NIP e N é abordado em Tygel et al. (1997). A expressão da aproximação dos tempos de trânsito de reflexões primárias relativos à vizinhança de um raio central normal, para configuração arbitrária, é dada por:

### (a) operador parabólico,

$$t(x_m, h) = t_0 + \frac{2\operatorname{sen}\beta_0}{v_0}(x_m - x_0) + \frac{\cos^2\beta_0}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}}\right);$$
(3.28a)

(b) operador hiperbólico,

$$t^{2}(x_{m},h) = \left(t_{0} + \frac{2\operatorname{sen}\beta_{0}}{v_{0}}(x_{m} - x_{0})\right)^{2} + \frac{2t_{0}\operatorname{cos}^{2}\beta_{0}}{v_{0}}\left(\frac{(x_{m} - x_{0})^{2}}{R_{N}} + \frac{h^{2}}{R_{NIP}}\right). \tag{3.28b}$$

Nestas equações  $t_0$  é o tempo-duplo de trânsito ao longo do raio central na configuração de AN, e  $v_0$  é a velocidade próxima a superfície ao redor de  $X_0$ . A relação entre as coordenadas do levantamento é dada por:

$$x_m = \frac{(x_G + x_S)}{2}$$
 e  $h = \frac{(x_G - x_S)}{2}$ . (3.29)

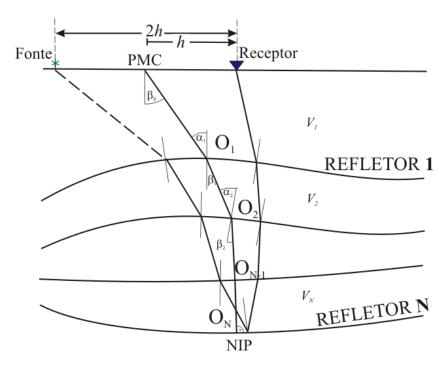


Figura 3.18. Modelo 2D de camadas com interfaces curvas mostrando o raio central de referência (incidência normal, NIP) e uma trajetória PMC com afastamento *2h*.

Fonte: Hubral (1980).

Nesta equações,  $x_m$  é o ponto-médio, h o meio-afastamento, em que  $x_S$  e  $x_G$  são as coordenadas horizontais da fonte e do receptor, respectivamente. A coordenada  $X_0 = (x_0, t_0)$  é o ponto de emergência do raio central com fonte-receptor coincidente na coordenada espacial  $x_0$  e na coordenada temporal  $t_0$ . A expressão para o tempo de trânsito é dada em função de  $v_0$  conhecida a priori, e ela é independente do modelo de macro-velocidades do meio e, portanto, aplicável a meios heterogêneos.

Para complementação, o cálculo de  $R_N$  e  $R_{NIP}$  nas equações acima, a lei da transmissão é aplicada para calcular o raio de curvatura de uma frente de onda N e NIP (BERGLER, 2001). Sendo assim, a partir da posição inicial sobre um ponto do refletor, sendo  $R_{i,inicial}^{(NIP)} = 0$ , e para a onda N  $R_{i,inicial}^{(N)} = R_{i,F}$ , em que  $R_{i,F}$  é o raio de curvatura da interface no ponto de incidência normal. O cálculo do raio de curvatura da frente de onda que se propaga dentro de uma camada, ao longo do raio normal, é calculado pela lei:

$$R_{i,P_2} = R_{i,P_1} + v_i \Delta t_i \,, \tag{3.30}$$

em que  $R_{i,P_1}$  e  $R_{i,P_2}$  são o raios de curvaturas das frentes de ondas nos pontos sucessivos  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente. A distância  $v_i \Delta t_i$  corresponde ao segmento reto do raio que une os pontos inicial e final dentro da *i*-ésima camada homogênea. Sendo  $V_i$  a velocidade e  $t_i$  a temposimples de trânsito do raio na *i*-ésima camada, o cálculo da curvatura de uma frente de onda transmitida é dada por:

$$\frac{1}{R_{i,T}} = \frac{v_{i+1}\cos^2\alpha_i}{v_i\cos^2\beta_i} \frac{1}{R_{i,I}} + \frac{1}{\cos^2\beta_i} \left(\frac{v_{i+1}}{v_i}\cos\alpha_i - \cos\beta_i\right) \frac{1}{R_{i,F}},$$
(3.31)

em que  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  são os ângulos de incidência e transmissão do raio central na interface i, respectivamente. As velocidades  $v_{i+1}$  e  $V_i$  correspondem, respectivamente, às camadas inferior e superior com relação a interface i, cujo raio de curvatura no ponto de incidência (ou de transmissão) é  $R_{i-1,F}$ . Dessa forma, são determinados os três atributos  $\beta_0$ ,  $R_{NP}$  e  $R_N$  do modelo sintético considerado. A Figura 4.3 mostra que a superfície de reflexão comum, baseada na teoria paraxial, é uma boa aproximação da resposta cinemática de uma reflexão sobre uma interface curva, baseada na teoria do raio.

O operador de empilhamento está ilustrado na Figura (3.19), onde a malha azul representa o dado observado, e a malha vermelha representa o operador de empilhamento CRS. Sendo assim, o processo de empilhamento visa o ajuste destas duas malhas, e a função objeto de minimização é o semblance, que neste caso é uma função de três parâmetros: ( $\beta_0$ ,  $K_{NIP}$ ,  $K_N$ ).

Um dos problemas na simulação de uma seção ZO consiste da determinação dos atributos da frente de onda ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ ) para cada ponto imagem da seção ZO a partir dos dados de multi-cobertura. Os três atributos cinemáticos são determinados simultaneamente por meio de otimização global a partir de estimativas inicias para  $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ . A função objeto de minimização é o cubo semblance resultante da varredura do operador de empilhamento sobre a seção sísmica. No problema de otimização, a busca dos pontos de máxima no espaço tridimensional (NxMxP) é definida nos intervalos por:  $-\pi/2 < \beta_0 < +\pi/2$  e  $-\infty < R_{NIP}, R_N < +\infty$ .

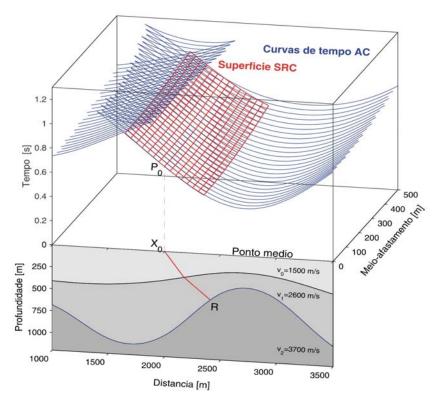


Figura 3.19. Parte inferior: Modelo composto por três camadas homogêneas. O raio de ZO (ou de incidência normal) tem cor vermelha. Parte superior: Superfície de cobertura múltipla (linhas em azul) correspondente às reflexões da segunda interface. A linhas de cor vermelha definem a superfície de empilhamento CRS, correspondente ao ponto de reflexão R, calculada através da aproximação hiperbólica do tempo-duplo de trânsito.

A obtenção dos atributos da frente de onda no presente trabalho segue a estratégia descrita em Mann (2002) para a busca bidimensional  $\beta_0$  e  $R_{NIP}$ . Na segunda etapa é feita a busca unidimensional do atributo,  $R_N$ . Na terceira etapa, a solução inicial é o trio de atributos resultante da primeira e segunda etapa.

Como resultados das etapas inicias, são obtidas 3 seções inicias para os atributos  $\beta_0^0$ ,  $R_{NIP}^0$  e  $R_N^0$  relativos a cada ponto imagem  $P_0(x_0,t_0)$  da seção ZO. Estas seções inicias são utilizadas para a determinação simultânea dos 3 melhores valores dos atributos ( $\beta_0$ ,  $R_{NIP}$  e  $R_N$ ) através de um algoritmo de otimização local. Nesta etapa, o modelo direto é o operador CRS, e a função objeto de minimização, o semblance. As seções do tiro de atributos ótimos resultantes desta etapa são utilizadas para produzir a seção ZO simulada.

### 4 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NMO/DMO

### 4.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

Todas as etapas de pré-processamento foram realizadas com o sistema CWP/SU desenvolvido pela "Colorado School of Mines" (STOCKWELL; COHEN, 2002), e inicia com a transformação do formato do arquivo da linha Tacutu-204-239 do formato SEG-Y para SU.

Nestas formatações, cada um dos traços que compõe uma seção sísmica possui um cabeçalho com 250 caracteres contendo informações dos parâmetros pertinentes ao levantamento, a partir das quais os utilitários são baseados. Neste cabeçalho, destacamos a numeração e as coordenadas dos pontos de tiro, das estações, de cada traço (geofone), das fontes e das seções.

Esta seção consiste principalmente na tarefa de relatar o dado de campo do Tacutu original; ou seja, o dado não processado. Após uma análise prévia, a linha selecionada para processamento foi a de número 204-239 (1986; NW-SE, 31,5km, 631 pontos de tiro, 4ms, 50m; 0,9kg, 2m, L-3x2/25m; lanço unilateral à direita 0-48, lanço simétrico 48-48, lanço assimétrico 76-20, lanço unilateral esquerdo 76-0). Processamento similar pode ser aplicado para todas as linhas dos dois blocos sísmicos (50 e 204) do Graben do Tacutu. A Figura 4.1 mostra um esquema da distribuição dos diferentes arranjos da linha 204-239 ao longo dos seus 31,5km.



Figura 4.1. Exemplo do arranjo de campo para a linha Tacutu 204-239. Direção: NE-SW. Extensão: 31,5km. Espaçamento entre estações: 50m. Total de estações (E): 631. Espaçamento entre fontes: 50m. Primeiro receptor: 100m da fonte. Primeiro ponto de registro: E=9. Distribuição das estações: E=9 à E=57 o arranjo é (0-48); da E=8 à E=259 o arranjo é (48-48); da E=260 à E=610 o arranjo é (76-20) e da E=611 à E=631 o arranjo é (76-0).

A tarefa inicial na etapa do pré-processamento e fundamental para todas as etapas do processamento é a organização correta da geometria do levantamento baseada no relatório de campo, e que serve para estabelecer os parâmetros a serem incluídos nos cabeçalhos a partir dos

quais os dados são selecionados para montar as seções desejadas, como por exemplo, do tipo CMP.

Para todas as apresentações de dados, a partir da verificação das seções FC até as fases de migração, sempre é aplicado ganho automático para se ter uma melhor visualização do conteúdo das seções.

Como uma primeira observação a respeito dos dados do Graben do Tacutu, a linha 204-239 possui muitas seções ruidosas, e por esta razão muitos conjuntos FC e RC são inicialmente silenciados. Posteriormente, como um resultado da análise visual de todos os conjuntos tirocomum, muitos traços individuais foram zerados devido ao alto nível de ruído, como impulsos e desvio térmico dos receptores.

Como uma segunda observação, muitos filtros de freqüência (filtro *F*) banda-passante trapezoidal foram experimentados, e decidimos adotar o filtro com os cantos 7-12-35-45 Hz por gerar seções afastamento comum com maior razão sinal ruído.

Como uma terceira observação, o filtro dependente da velocidade (filtro *F-K*) foi utilizado para enfatizar posterior filtragem das altas e baixas frequências, bem como ondas de superfície e refração crítica. Uma das formas de decidir sobre a adoção dos parâmetros do filtro foi baseada na análise dos conjuntos de traços através dos espectros e empilhamentos resultantes.

Enfatizamos mais uma vez a importância do pré-processamento para os resultados tanto do empilhamento NMO/DMO quanto do empilhamento CRS, e sua flexibilidade, sendo adaptado às características apresentadas pelo dado. Aos dados do Tacutu não foi realizada correção estática devido a suave topografia do platô do Tacutu. A deconvolução ao impulso foi aplicada aos dados, porém, os resultados obtidos não tiveram uso devido a sua baixa qualidade.

As figuras que se seguem na seção pré-processamento estão na seqüência: espectro (temporal) total das linhas; espectro (temporal) da seção CMP; seção temporal CMP; filtragem F banda-passante trapezoidal; filtragem F-K banda-passante trapezoidal; e seção deconvolvida por WHL ao impulso. A intenção foi que as figuras tivessem um texto mais explicativo possível. Nestas figuras, a amplitude fica caracterizada pela cor, e a escala da seção depende do ganho.

As Figuras 4.2 a 4.5 têm por eixos Freqüência vs Número-do-Traço, e elas representam os espectros de freqüência de todos os traços da linha 204-239 antes da aplicação de filtragens banda-passante, e após o silenciamento. O objetivo desta figura é a análise do conteúdo espectral para que se proceda à determinação do filtro banda-passante para separação de ruído. Pela análise visual, observa-se a presença de sinal até na freqüência de 125 Hz. Para a componente

determinística da seção, o conteúdo importante de frequências é admitido como relacionado à faixa 5-40 Hz, sendo a faixa acima de 40Hz considerada como ruído (componente não determinística). A amplitude fica por conta da escala em cores, e as maiores amplitudes estão na faixa do vermelho. O resultado da análise espectral fica resumido à definição do filtro F bandapassante trapezoidal com cantos (07; 12; 35; 45), e à definição do filtro F-K banda-passante trapezoidal com inclinações (-0,00035; -0,00005; +0,00035).

As Figuras 4.6 a 4.8 são seções tempo-distância do tipo Seção CMP (número 200 da linha 204-239) antes e depois das aplicações dos filtros *F* banda-passante trapezoidal. Para efeito de visualização estão apresentadas duas seções: uma sem ganho e outra com ganho. O ganho aplicado (DGC) serve apenas para melhorar a visualização, enfatizando aspectos desejados, enquanto a seção sem ganho é a que é utilizada no processamento para evitar deformação espectral. Nestas duas apresentações fica bem distinta a presença das ondas de superfície, e ficam mais evidentes a presença de eventos de reflexão com a forma hiperbólica.

As Figuras 4.9 a 4.10 exibem espectros na forma Freqüência vs Número do traço para a seção CMP-200 da linha 204-239, antes e depois da aplicação do filtro *F-K* banda-passante trapezoidal. Esta figura serviu para o teste de filtro escolhido com as inclinações (-0,00035; -0,00005; +0,0005; +0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0). A escala é devido ao ganho para a apresentação, e observa-se que o resultado do filtro tem como saída uma trapezoidal para o espectro. Nestas figuras não está sendo analisado o efeito de contaminação por amostragem ("aliasing").

As Figuras 4.11 a 4.12 são seções tempo-distância do tipo PMC (número 200 da linha Tacutu 204-239) antes e depois da aplicação do filtro *F-K* mostrado nas figuras anteriores. Ambas as seções não possuem ganho dinâmico para comparação. Como resultado, observa-se a destruição parcial da forma Delta onde as refrações estão presentes.

As Figuras 4.13 (seção tempo vs distância, tipo PMC-200 da linha Tacutu 204-239) antes e depois da aplicação do processo de deconvolução ao impulso Wiener-Hopf-Levinson. A seção utilizada passou pelos filtros F e F-K, como visto nas figuras anteriores. Ambas as seções têm ganho dinâmico e servem para comparar com as figuras anteriores. Como resultado, observase o ganho de conteúdo nas freqüências mais altas, e a contaminação por amostragem nas bordas ("aliasing"). Como esperado, o aspecto da saída é indesejavelmente mais ruidoso, mesmo considerando que a seção passou por uma filtragem banda-passante.

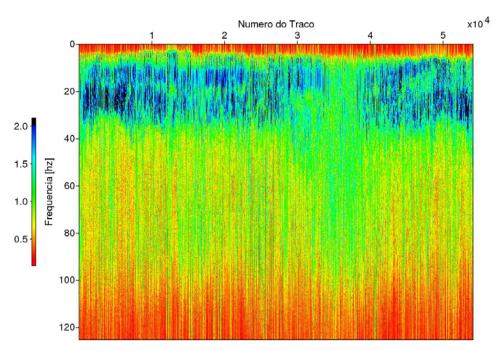


Figura 4.2. Espectro de freqüência vs número do traço de todos os traços da linha 204-239 antes da aplicação de filtragens banda-passante, e antes de silenciamento. Observa-se a presença de sinal até na freqüência de 125 Hz. Pela análise visual voltado à componente determinística da seção, o conteúdo importante de freqüências está relacionado à faixa 5-40 Hz, sendo a faixa acima de 40Hz considerada como ruído. A amplitude fica expressa na escala em cores.

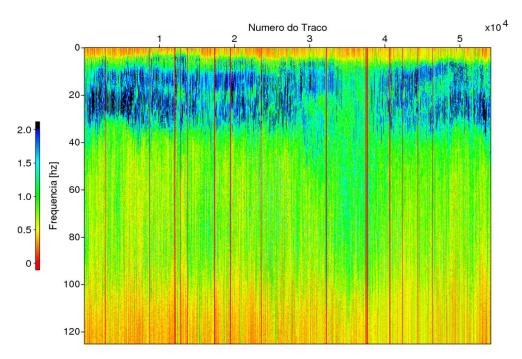


Figura 4.3. Espectro de freqüência vs número do traço de todos os traços da linha 204-239 antes da aplicação de filtragens banda-passante, e depois de silenciamento. Os traços zerados podem ser vistos como linhas do início ao fim da figura. A amplitude é expressa na escala em cores.

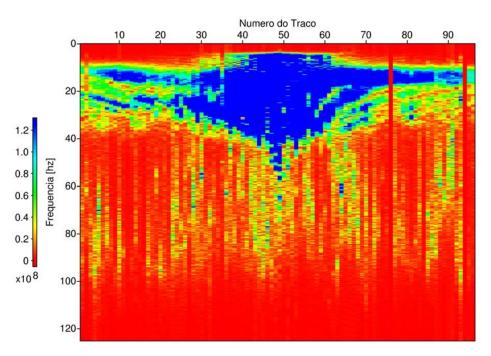


Figura 4.4. Freqüência vs número do traço. Composição do espectro de freqüência para todas os traços de uma seção FC da linha 204-239 (número 200) antes da aplicação de filtragens banda-passante, e depois de silenciamento, e corresponde a um detalhe da figura anterior par servir em teste de filtros. A escala de amplitude em cores reflete o ganho para a apresentação.

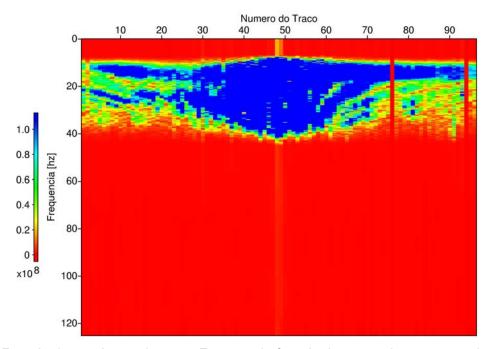


Figura 4.5. Freqüência vs número do traço. Espectro de freqüência para todas os traços de uma seção CSG da linha 204-239 (número 200) após a aplicação da filtragem *F* banda-passante, e depois de silenciamento. Esta figura corresponde a um detalhe da figura anterior, e serviu para o teste dos filtros. O filtro banda-passante trapezoidal tem os cantos 7-12-35-45 Hz. A escala de amplitude em cores reflete o ganho para a apresentação.

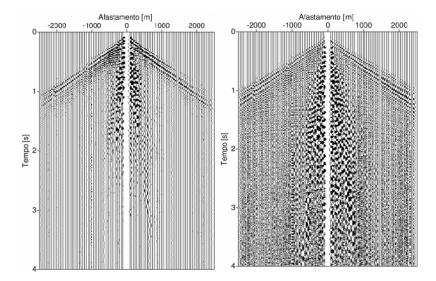


Figura 4.6. Seção FC-200 tempo vs distância da linha 204-239 antes da aplicação do filtro *F* banda-passante. Para efeito de visualização estão apresentadas duas seções: (esquerda) Seção sem ganho; (direita) seção com ganho. O ganho aplicado (DGC) serve apenas para melhorar a visualização, enfatizando aspectos desejados, enquanto a seção sem ganho é a que é utilizada no processamento para evitar deformação espectral. Nestas duas apresentações fica distinta a presença de ondas de superfícies e na seção á direita fica mais visível a presença de eventos de reflexão com a forma hiperbólica.

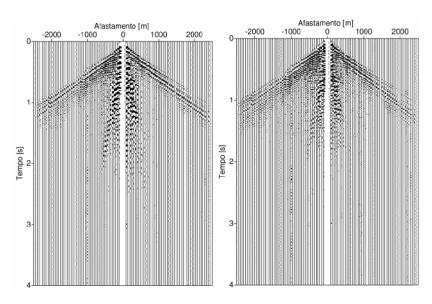


Figura 4.7. Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239 após a aplicação de dois filtros banda-passante *F*: (esquerda) saída com o filtro *F* com a opção de cantos 7-12-35-45 Hz; e (direita) saída do filtro *F* com a opção de cantos 8-20-40-45 Hz. A estas seções não foi aplicado ganho dinâmico.

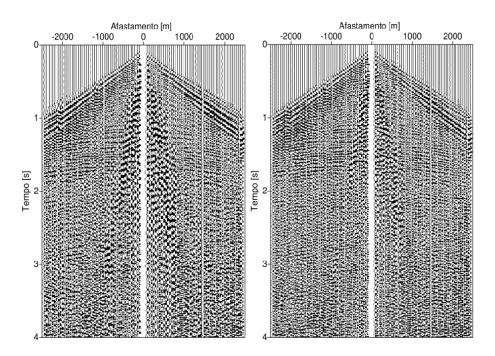


Figura 4.8. Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239 após a aplicação de dois filtros banda-passante *F* seguidos de controle de ganho dinâmico (DGC): (esquerda) saída com o filtro *F* com a opção de cantos 7-12-35-45 Hz; e (direita) saída do filtro *F* com a opção de cantos 8-20-40-45 Hz.

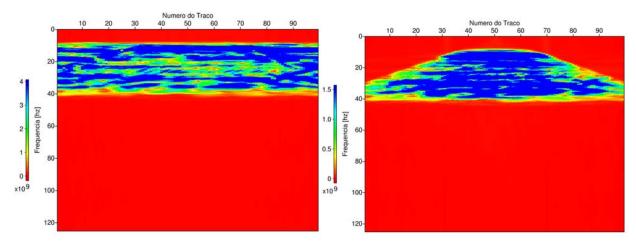


Figura 4.9. Espectro de freqüência vs número do traço para a seção FC-200 da linha 204-239, sendo (esquerda) antes da aplicação do filtro *F-K* banda-passante trapezoidal, e (direita) após a aplicação do filtro. Esta figura serviu para o teste de filtro, escolhido com as inclinações (-0,00035; -0,00005; +0,0005; +0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0). A escala é devido ao ganho para a apresentação. Observa-se que o resultado do filtro resulta na forma trapezoidal para o espectro. Não está sendo analisado o efeito de contaminação por amostragem ("aliasing").

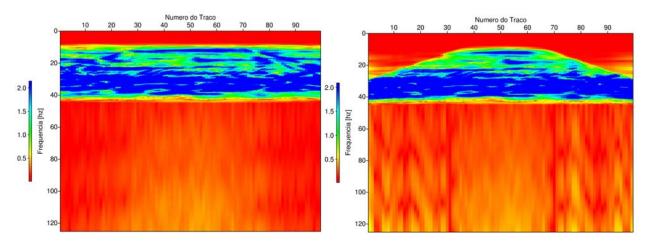


Figura 4.10. Espectro de freqüência vs número do traço correspondente à figura anterior, onde ganho foi aplicado para observar a presença de ruído na parte mais alta do espectro. A escala reflete o ganho utilizado para a apresentação. Observa-se que o filtro resulta numa forma trapezoidal para o espectro, e a presença de contaminação por amostragem ("aliasing") pode ser vista.

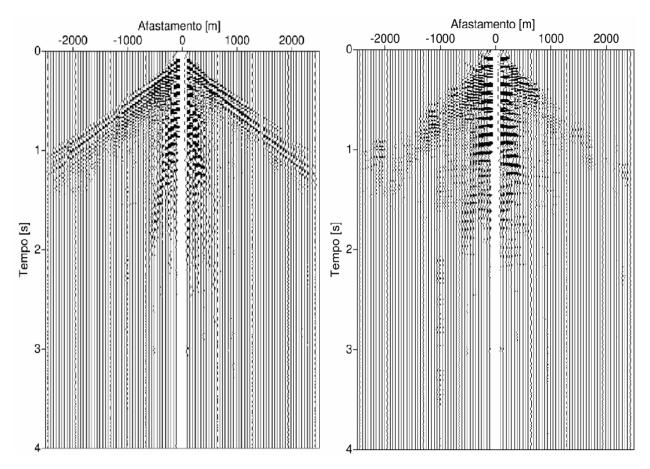


Figura 4.11. Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do filtro *F-K* nas figuras anteriores com os parâmetros de inclinação (-0,00035; -0,0005; -0,0005; 0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0). Ambas as seções não possuem ganho dinâmico para comparar com as próximas figuras. Observa-se a destruição parcial da forma Delta onde as refrações estão presentes.

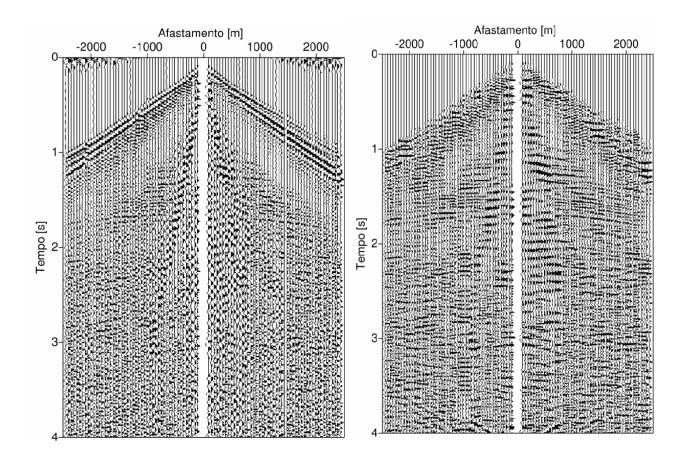


Figura 4.12. Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do filtro *F-K* nas figuras anteriores com os parâmetros de inclinação (-0,00035; -0,0005; -0,0005; 0,00035) e amplitude (0; 1; 1; 0). Ambas as seções possuem ganho dinâmico para comparar com as figuras anteriores. Observa-se a destruição parcial da forma Delta onde as refrações estão presentes, e a contaminação por amostragem nas bordas ("aliasing"). As ondas de superfície diminuíram sensivelmente, e trajetórias "hiperbólicas" de reflexão são visíveis.

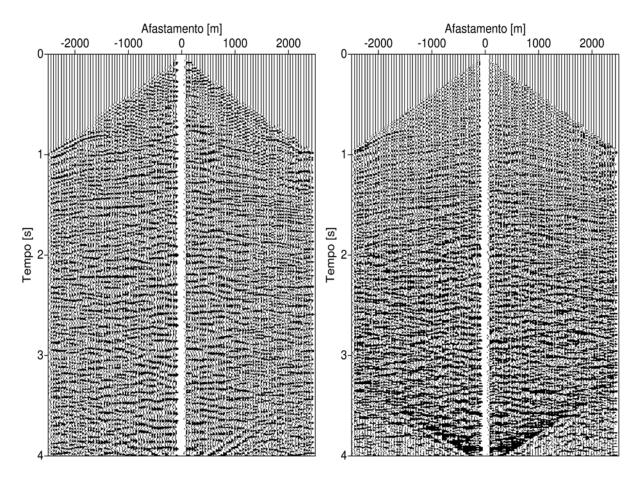


Figura 4.13. Seção FC-200 tempo vs distância da linha Tacutu 204-239, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do processo de deconvolução ao impulso Wiener-Hopf-Levinson. A seção utilizada passou pelos filtros F e F-K como visto nas figuras anteriores. Ambas as seções têm ganho dinâmico e servem para comparação com as figuras anteriores. Observa-se o ganho de conteúdo nas freqüências mais altas, e a contaminação por amostragem nas bordas ("aliasing"). Como esperado, o aspecto da saída é indesejavelmente mais ruidoso, mesmo com a filtragem banda-passante aplicada previamente à deconvolução.

### 4.2 PROCESSAMENTO CONVENCIONAL

As etapas do processamento convencional (NMO/DMO) foram realizadas com o pacote de processamento Seismic Un\*x (STOCKWELL; COHEN, 2002).

Como organizado no fluxograma ilustrado na Figura 1.1, o processamento convencional segue a seqüência: análise de velocidade, correções NMO e DMO, empilhamento e migração no tempo Gazdag (GAZDAG, 1978 e GAZDAG; SGUAZZERO, 1984).

### 4.2.1 Análise de velocidade

Estudamos no Capítulo 3 os princípios da análise de velocidade. Constatamos a necessidade de se estimar a velocidade a partir dos dados sísmicos de reflexão. A estimativa da velocidade a partir dos dados é um problema de inversão mal-posto, uma vez que os mesmos não contêm todas as informações necessárias para definir a função velocidade que varia arbitrariamente tanto com a profundidade quanto ao longo da direção horizontal. Portanto, esta estimativa é tão melhor quanto maior for a qualidade dos dados, e, por conseguinte, melhor será a qualidade da seção empilhada resultante. Em muitas situações práticas o conhecimento a priori do comportamento da função velocidade (e. g., dados de poço) complementam a informação contida nos dados sísmicos. Infelizmente este não é o caso presente e a estimativa da velocidade não foi suficiente para adequar ao problema de restrição. A Figura 4.14 mostra alguns resultados da análise de velocidade baseada no princípio de perfis de coerência que compõem as seções PMC de número (da esquerda para a direita, de cima para baixo) 5450, 10450, 15450, 20450, 25450 e 30450, segundo a descrição de Neidel e Taner (1971) de análise espectral de velocidades. Onde se observa a pequena variação entres as distribuições de velocidades, e a pouca quantidade de informações contidas no espectro, o que dificultou a marcação das velocidades (picking). A Figura 4.15 mostra o resultado que obtivemos com a análise de velocidade para uma seção FC através de empilhamentos sucessivos e comparativos para diferentes perfis de velocidade em subsuperficie. Este processo foi realizado em seções FC espaçadas de 1,0 km.

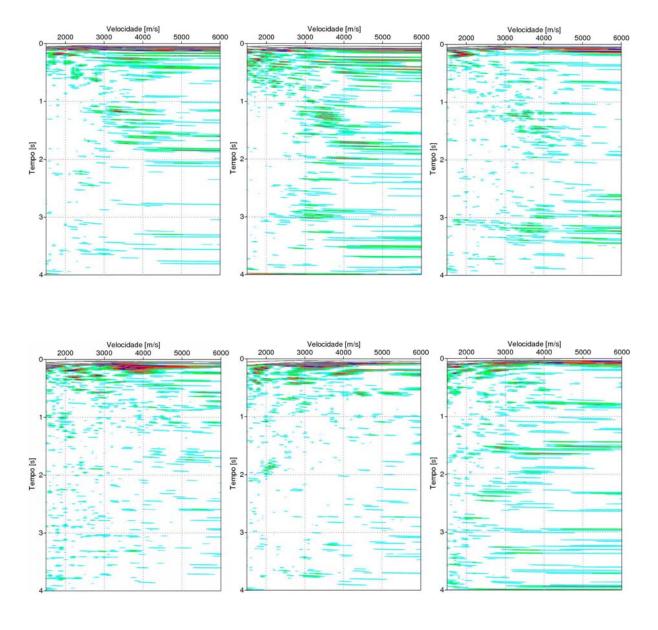


Figura 4.14. Espectros de velocidades calculados utilizando o critério de coerência *Semblance* a partir das seções CDP (da esquerda para a direita, de cima para baixo) de número 5450, 10450, 15450, 20450, 25450, 30450. Seções tempo vs velocidade. Exemplo da análise de velocidade SU/NMO da linha Tacutu-204-239. Observa-se a semelhança entres as distribuições de velocidade ao longo de toda a linha.

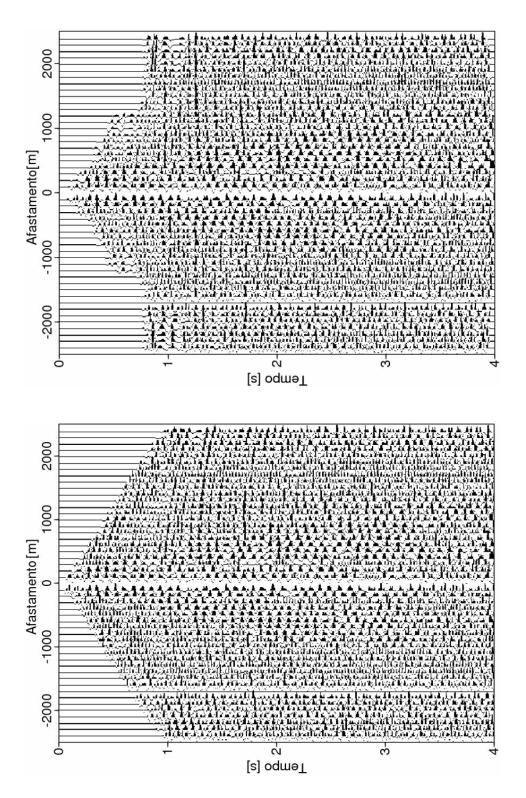


Figura 4.15. Seções tempo vs afastamento. Exemplo da análise de velocidade SU/NMO da linha Tacutu-204-239 FC-1000. Observa-se a forma hiperbólica (esquerda) dos eventos de reflexão, e a transformação (direita) para a forma linear, notadamente na faixa até os 2s. Observa-se ainda a presença de estiramento NMO para os traços com grande afastamento.

Para se obter o perfil de velocidades, necessário para a correção NMO, realizamos duas análises de velocidades distintas, uma análise de velocidade 1D, com variação apenas no eixo vertical (tempo) e uma análise de velocidade 2D com variações verticais (tempo) e horizontais (PMC). Como um dos resultados gerais, a qualidade dos dados nos permitiu obter pouco detalhe da variação horizontal de velocidades. A qualidade do empilhamento realizado com perfil de velocidades 2D, como mostrado na Figura 4.17 não é muito superior ao realizado com perfil de velocidades 1D, como mostrado na Figura 4.16. Concluímos, portanto, que para as linhas sísmicas do grupo 204 do graben do Tacutu uma distribuição de velocidades 1D é suficientemente razoável para explicar o empilhamento NMO.

# 4.2.2 Empilhamento NMO

O processo de empilhamento NMO foi realizado de duas maneiras, com um modelo de velocidades 1D, resultante da análise de velocidade otimizada visualmente, e com um modelo de velocidades 2D obtido pela análise de velocidade realizada com os espectros de velocidades baseado no critério de coerência semblance. As Figuras 4.16 e 4.17 mostram o resultado com baixa qualidade para o empilhamento gerado com o perfil de velocidades 1D. O critério aqui utilizado para se medir a qualidade das seções empilhadas foi a continuidade dos traços e a análise da relação sinal/ruído. Este resultado é coerente com a análise de velocidade 1D que se mostrou insensível à variação lateral. A figura 4.18 mostra o resultado do empilhamento NMO gerado com os perfis de velocidades 2D, evidenciando a qualidade um pouco superior ao resultado do empilhamento 1D mostrado nas Figuras 4.16 e 4.17. Para efetuar uma comparação mais rigorosa devemos adotar as Figuras 4.17 e 4.18, por apresentarem as mesmas escalas (janela 2,0 s x 20,0 s).

A Figura 4.19 mostra o resultado do empilhamento gerado com um modelo 1D de velocidades após a deconvolução WHL, observa-se a qualidade inferior ao da Figura 4.16.

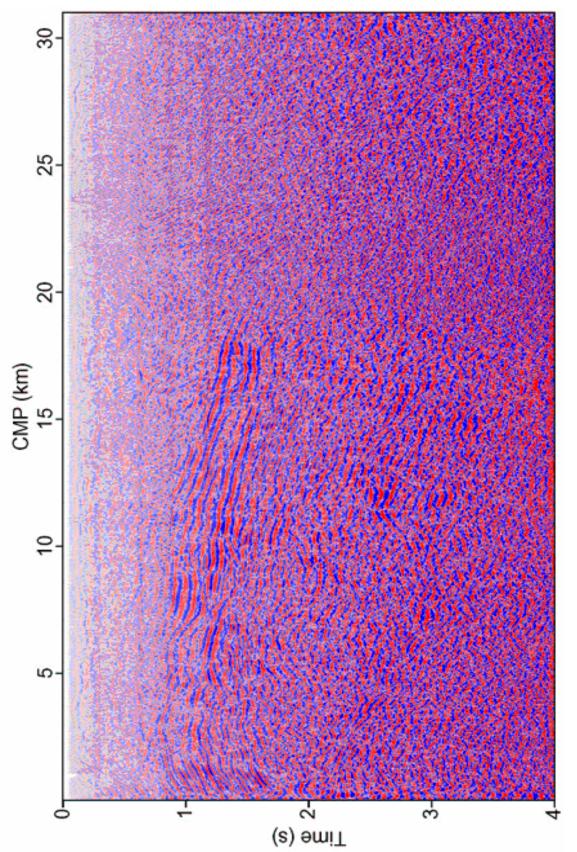


Figura 4.16. Seção empilhada NMO 1D completa (janela 4,0s x 31,5km) da linha 204-239. Observa-se que as estruturas esperadas estão representadas numa janela limitada a 2,0 s x 20,0 km.

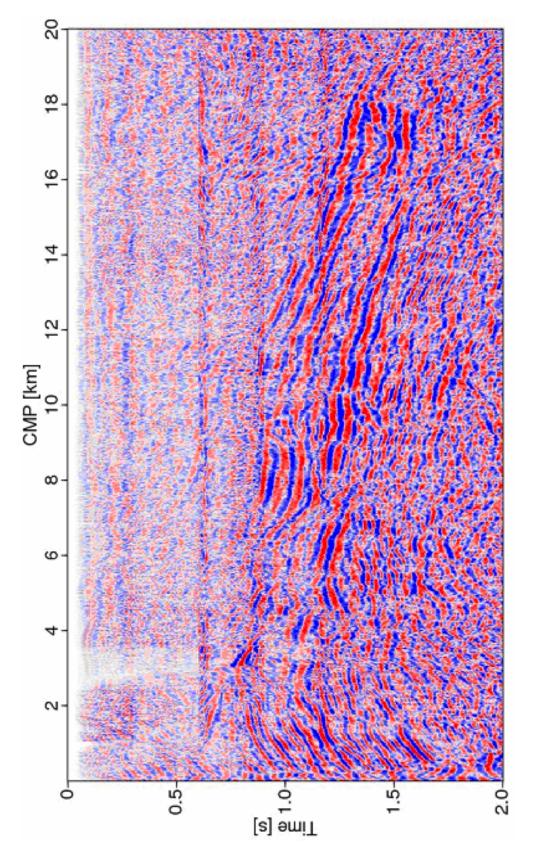


Figura 4.17. Seção empilhada NMO (janela 2,0 s x 20,0 km) sem deconvolução gerada a partir de um modelo 1D de velocidades. Esta figura é para ser comparada às figuras 4.18 e 4.20.

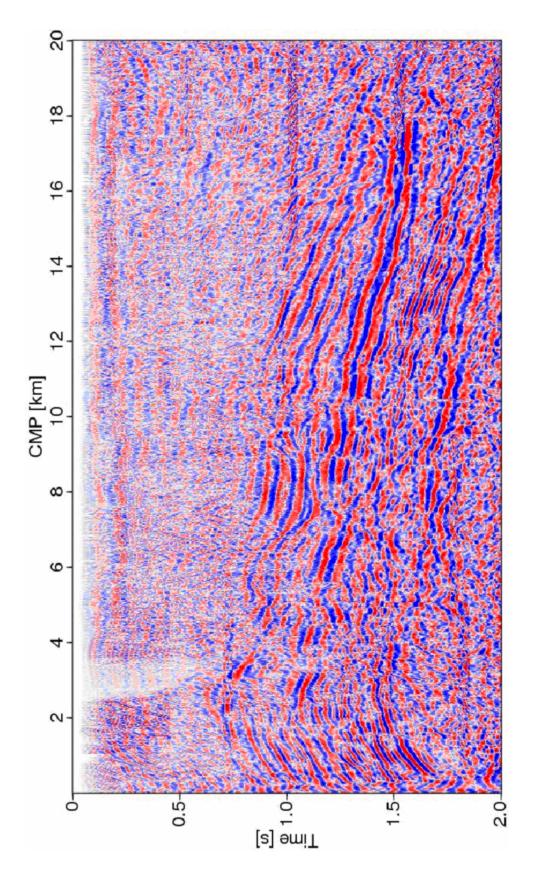


Figura 4.18. Seção empilhada NMO (janela 2,0 s x 20,0 km) gerada a partir de um modelo 2D de velocidades. Esta figura é para ser comparada às Figuras 4.17 e 4.20.

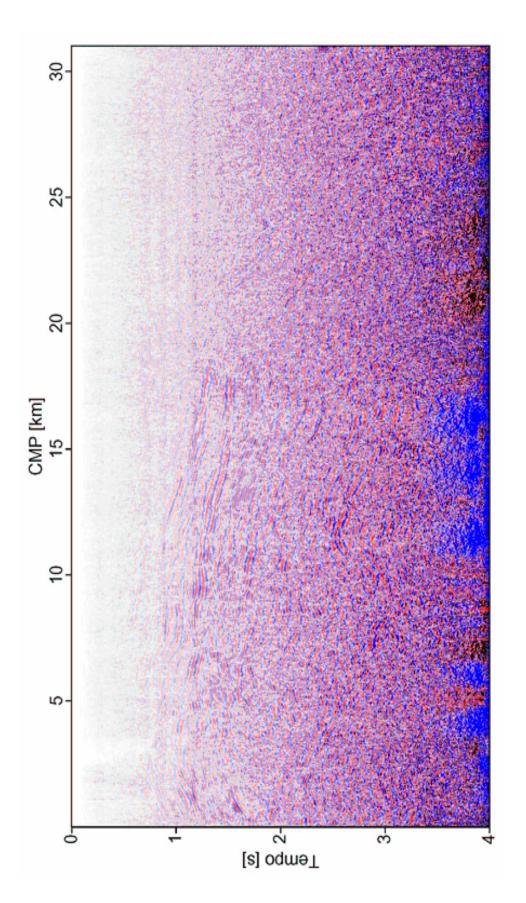


Figura 4.19. Seção empilhada NMO 1D (janela 4,0s x 31,5km) da linha 204-239 simulada após a deconvolução WHL ao impulso. Observase que as estruturas estão mal expostas e limitadas à janela de 2,0 s x 20,0 km. A maior parte da seção não traz informações relevantes.

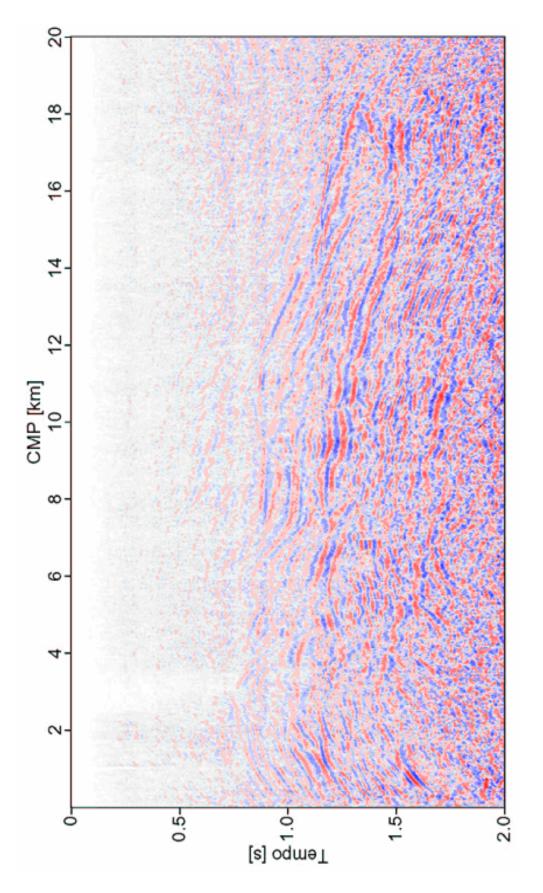


Figura 4.20. Seção empilhada NMO 1D (janela 2,0 s x 20,0 km) da linha 204-239 com deconvolução WHL.

## 4.2.4 Empilhamento DMO

O processo de correção DMO utilizou um modelo de velocidade 1D resultante da análise de velocidade otimizada visualmente. A Figura 4.21 mostra o resultado do empilhamento DMO 1D para a linha 239 com a janela limitada a 4,0 s por 31,5 km, e a Figura 4.22 mostra o detalhe para a janela limitada a 2,0 s por 20,0 km. Este resultado é coerente com a análise de velocidade 1D que utilizou uma distribuição de velocidades apenas com variação vertical, uma vez que este se mostrou insensível a variações laterais.

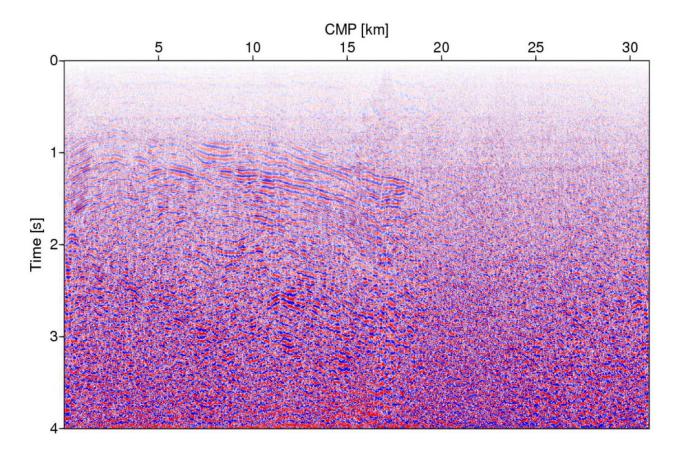


Figura 4.21. Linha 204-239. Seção empilhada DMO completa (janela 4s x 31,5km).

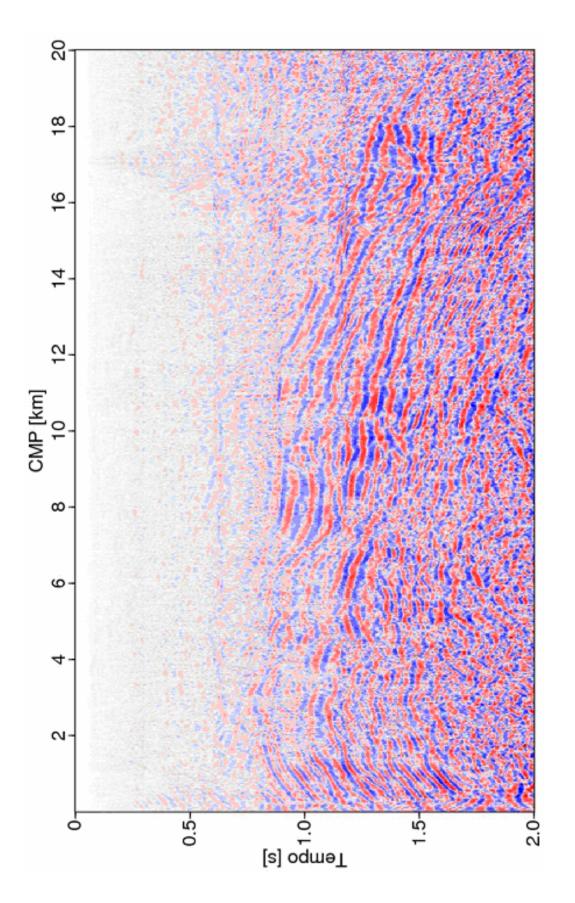


Figura 4.22. Seção mostrando o resultado do empilhamento NMO/DMO 1D da linha 204-239 limitada à janela 2,0 s x 20,0 km.

### 4.2.4 Migração

O processo de migração utilizado no processamento SU foi a migração denominada migração Gazdag (GAZDAG, 1978 e GAZDAG; SGUAZZERO, 1984), descrita no domínio da freqüência como método de deslocamento de fase. Para isto foi utilizado um modelo 1D de velocidades. A Figura 4.23 mostra o resultado de baixa resolução para a linha 239 com base na seção empilhada SU/NMO (Figura 4.16), medida através da continuidade dos refletores e da relação sinal/ruído. Este resultado é coerente com a análise de velocidade que se mostrou insensível lateralmente, o que quer dizer que uma única distribuição de velocidade obtida para uma seção FC foi suficiente para promover o empilhamento NMO de toda a linha.

A Figura 4.24 é uma parte da Figura 4.23 limitada à janela 2s x 20,0km, com a intenção de mostrar detalhes da porção que mostrou a presença de estruturas. As informações nela contida serão úteis quando da apresentação da seção interpretada com as delineações de refletores no capítulo Conclusões Gerais.

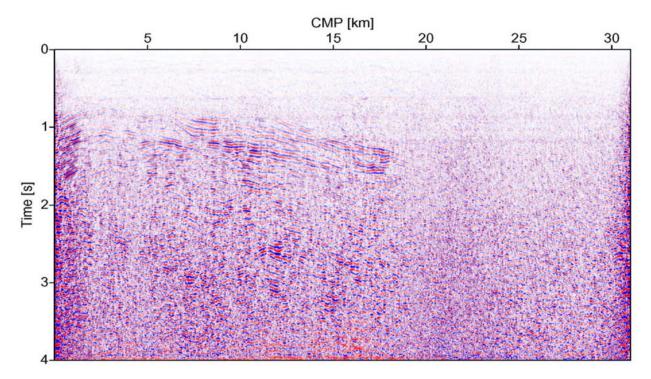


Figura 4.23. Linha 204-239. Seção migrada completa (janela 4,0 s x 31,5 km) no tempo resultante da aplicação da técnica SU/Gazdag sobre a seção empilhada NMO completa da Figura 4.16. Observa-se que as estruturas esperadas estão representadas na janela limitada a 2,0 s x 20,0 km. A maior parte da seção não traz informações relevantes.

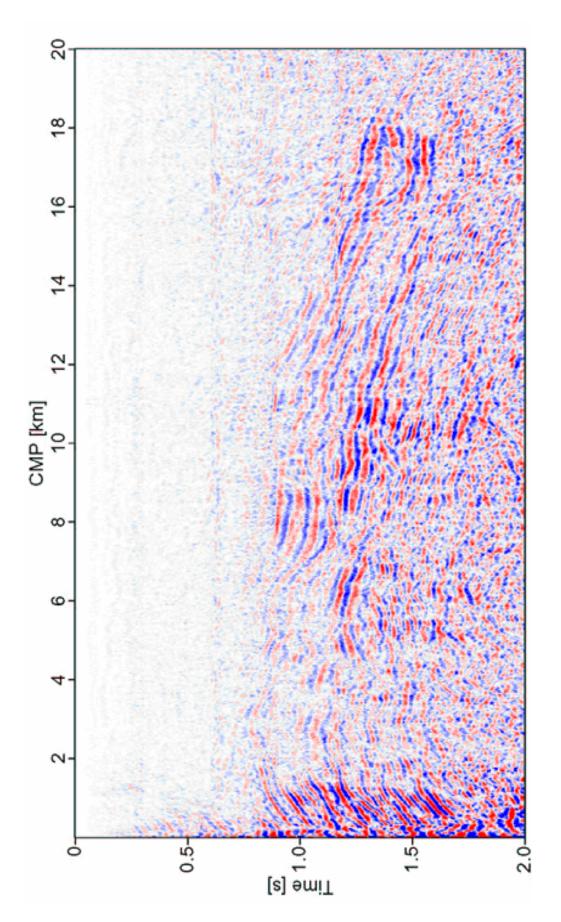


Figura 4.24. Linha 204-239. Seção migrada tipo Gazdag destacada da Figura 4.23. Algumas estruturas estão destacadas nesta janela (2,0 s x 20,0 km) para análise de detalhes. Observam-se: a tendência geral de mergulho para a direita; formas curvas de anticlinais e sinclinais; e descontinuidade vertical.

#### 5 RESULTADOS DO SISTEMA WIT/CRS

Apresentamos neste capítulo resultados com o sistema WIT/CRS centrado no imageamento por empilhamento de Superfície de Reflexão Comum (CRS).

O sistema WIT/CRS foi aplicado aos dados reais da bacia sedimentar do Tacutu, e procuramos mostrar a relação do CRS ao sistema convencional NMO/DMO o que é altamente dependente de um modelo de velocidades para produzir resultados plausíveis. Um dos aspectos do empilhamento CRS que o torna atrativo é o aumento da relação sinal/ruído (S/R) indicada através da continuidade e identificação dos eventos de reflexão correlacionados.

Além de produzir uma seção empilhada (Figura 5.6) com imagem final de melhor resolução sinal/ruído quando comparado ao empilhamento NMO/DMO (Figuras 4.16 a 4.24), o método CRS fornece subprodutos que são os três painéis dos atributos cinemáticos de frente de onda (Figuras 5.3 a 5.5). Estes painéis são úteis para várias aplicações, como na determinação do modelo de macro-velocidades (Figura 5.9), na inversão tomográfica (Figura 5.8) e outras etapas posteriores de imageamento como a migração (Figuras 5.12 e 5.13).

O caso usado de empilhamento CRS é o 2D com a superfície de observação plana. Neste método, apenas a velocidade próxima à superfície precisa ser estabelecida, e os atributos da frente de onda são estimados diretamente dos dados em multi-cobertura (JÄGGER et al, 2001). No presente caso, a simulação ao afastamento-nulo (ZO) emprega o conceito de aproximar o refletor por meio de três parâmetros (ou atributos), além da velocidade próxima à superfície. Os três atributos cinemáticos das ondas hipotéticas NIP e N são relacionadas ao raio normal emergente no ponto  $x_m = x_0$ , e são o ângulo de emergência ( $\beta_0$ ) do raio NIP, o raio de frente de onda do raio NIP,  $R_{NIP}$  (ou sua curvatura  $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$ ) e o raio da frente de onda N,  $R_N$  (ou da sua curvatura  $K_N = 1/R_N$ ) (ver Capítulo 3).

Os modelos de iso-velocidades podem ser transformados em modelos de macro-velocidades (MV) por suavização, ou este problema pode ser transformado para inversão tomográfica, o que significa determinar o modelo de velocidade usando a informação contida na resposta da reflexão da subsuperfície (DUVENECK, 2002). Entre os painéis ZO e MV, é necessário se aplicar uma rotina de marcação automática assistida (picking) para se obter a tabela de valores tempo-distância de entrada à rotina de inversão (arquivo editável sobre a seção ZO do CRS). Como o empilhamento é realizado considerando uma velocidade fixa,  $v(x,z) = v_0$ , o

processo de inversão tomográfica procura resgatar uma distribuição de velocidades 2D; isto é, v(x,z), plausível com as informações a priori ditadas pela geologia.

Para que uma seção seja interpretada, é necessário que, além das etapas de processamento, a seção seja preparada em cores com tons que realce aspectos diferentes para dar ao interprete uma base a mais para sua criatividade. Muitos programas de computador existem para processar especificamente imagens pela aplicação de filtros diversos, de sombreamentos, de tendenciosidades, de ganhos dinâmicos e calcular estatísticas.

Além da produção de cores, uma das tarefas importantes da interpretação de dados sísmicos é procurar definir o valor numérico do Exagero Vertical ( $E_V$ ). Numa seção tempodistância (e.g., seção ZO), considerando uma pequena porção ( $\Delta t$ ) do eixo t-tempo, ( $\Delta x$ ) do eixo x-distância e ( $\Delta z$ ) do eixo z-profundidade, o exagero vertical é definido como sendo a razão entre a inclinação aparente  $p_a = \Delta t/\Delta x$  e a inclinação verdadeira  $p_v = \Delta z/\Delta x$ , onde  $\Delta t = 2\Delta z/v$ ;  $E_V = p_a/p_v = \Delta t/\Delta z = 2/v$ . Por esta relação, uma vez que em geral a velocidade aumenta com a profundidade, o exagero vertical diminui com a profundidade. Para um meio de variação contínua de velocidade: dz/dt = v(z)/2, então  $E_V = dt/dz = 2/v(z)$ . Uma seção migrada à profundidade tem a conveniência de se poder colocar o valor do exagero vertical a unidade; isto é,  $E_V = 1$ , pelo ajuste da figura.

#### 5.1 ATRIBUTOS DA FRENTE DE ONDA E EMPILHAMENTO

A Figura 5.1 representa o painel da densidade de traços que participam do painel de coerência Semblance. Cada ponto  $P_0(x_0,t_0)$  da seção tempo vs distância (do CMP da origem da linha) é caracterizada pela cor que indica a quantidade de traços da malha que do operador de empilhamento CRS no ponto  $P_0(x_0,t_0)$ .

A Figura 5.2 representa o painel de coerência Semblance para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção. Como o valor da coerência Semblance está indicado através da escala ao lado, a cor vermelha é o tom que indica o valor mais alto. Comparando com outros casos, observa-se o baixo valor relativo da Coerência, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta destaque.

A Figura 5.3 representa a distribuição do atributo  $R_{NIP}$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção a ser simulada. O valor do atributo está indicado através da escala ao lado, que indica que a cor vermelha é a mais alta. Observa-se uma distribuição aparentemente aleatória para este atributo, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta algum destaque. A presença de estruturas bem delineadas requer distribuições não aleatórias, para aparecer a componente determinística do meio. A Figura 5.4 representa a distribuição do atributo  $R_N$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção a ser simulada. O valor do atributo está indicado através da escala ao lado que indica que a cor vermelha tem o valor mais alto. Observa-se uma distribuição aparentemente aleatória para o atributo, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta algum destaque. A Figura 5.5 representa a distribuição do atributo  $\beta_0$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção ZO a ser simulada. Figura tempo vs distância do CMP da origem da linha. O valor do atributo está indicado através da escala ao lado que indica que a cor vermelha tem o valor mais alto. Observa-se uma distribuição aparentemente aleatória para o atributo, e a faixa 2,0s x 20,0km não apresenta destaque.

A Figura 5.6 representa o resultado da seção empilhada ao afastamento-nulo simulada a partir dos atributos descritos acima. Nesta figura observa-se a continuidade dos traços na faixa 2,0s x 20,0km, e as outras áreas não apresentam destaque maior. Esta seção pode ser visualmente comparada à seção da Figura 4.16. Como análise interessante, embora as distribuições de  $R_{NIP}$ ,  $R_N$  e  $\beta_0$  se apresentem como aparentemente aleatórias, contraditoriamente, o resultado do empilhamento apresenta coerência em muitos aspectos da seção simulada. A Figura 5.7 representa o destaque da faixa 2,0s x 20,0km para uso na interpretação de delineamento de refletores. Esta seção pode ser visualmente comparada à seção da Figura 4.18.

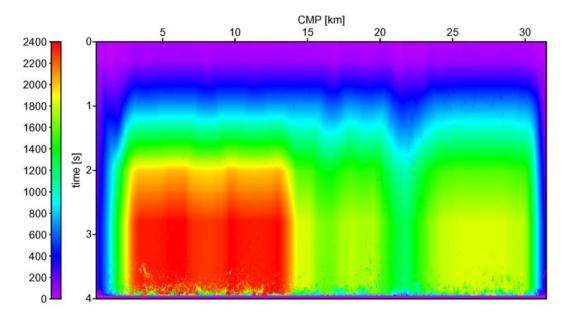


Figura 5.1. Painel da densidade de traços da Coerência Semblance da seção  $P_0(x_0,t_0)$ . Figura tempo vs distância (do CMP da origem da linha). Número de traços que participam do empilhamento CRS. A escala ao lado indica que a cor vermelha é a de valor mais alto.

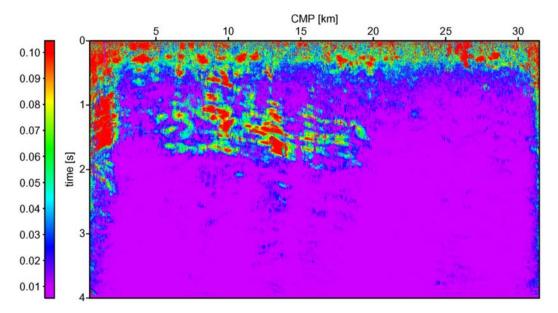


Figura 5.2. Painel da distribuição da função Coerência Semblance dos pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção tempo vs distância. O valor da coerência Semblance está indicado através da escala ao lado, que indica que a cor vermelha é a de valor mais alto. Observa-se o baixo valor relativo da Coerência, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta destaque. Os painéis ditos otimizados resultam da filtragem dos painéis originais com base num valor mínimo admissível para a distribuição.

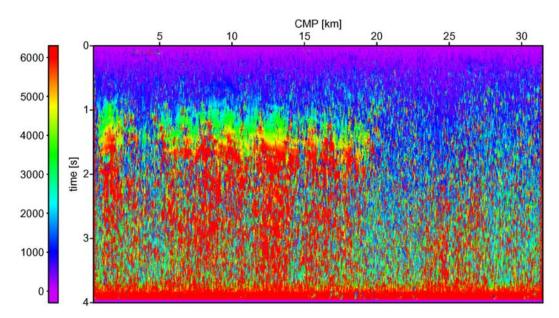


Figura 5.3. Distribuição do atributo  $R_{\it NIP}$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção tempo vs distância (posição do CMP da origem da linha). O valor do atributo está indicado através da escala ao lado que indica que a cor vermelha é a de valor mais alto. Observa-se uma distribuição aparentemente aleatória para o atributo, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta algum destaque.

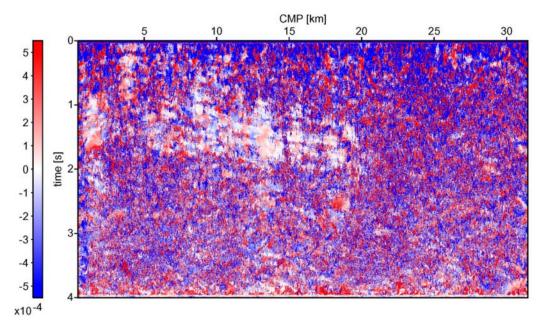


Figura 5.4. Distribuição do atributo  $R_N$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção tempo s distância. Observase uma distribuição aparentemente aleatória para o atributo, e apenas a faixa 2,0s x 20,0km apresenta algum destaque.

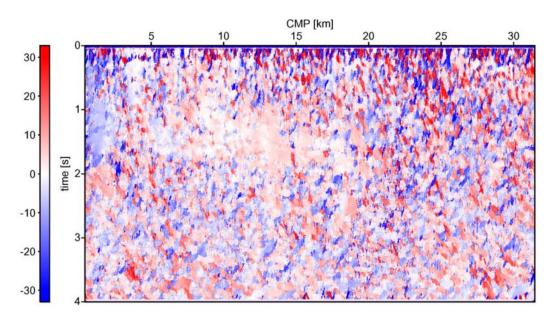


Figura 5.5. Distribuição do atributo  $\beta_0$  para os pontos  $P_0(x_0,t_0)$  da seção tempo vs distância. O valor do atributo está indicado através da escala ao lado, que indica que a cor vermelha é a de valor mais alto. Observa-se uma distribuição aparentemente aleatória para o atributo, e a faixa 2,0s x 20,0km não apresenta destaque.

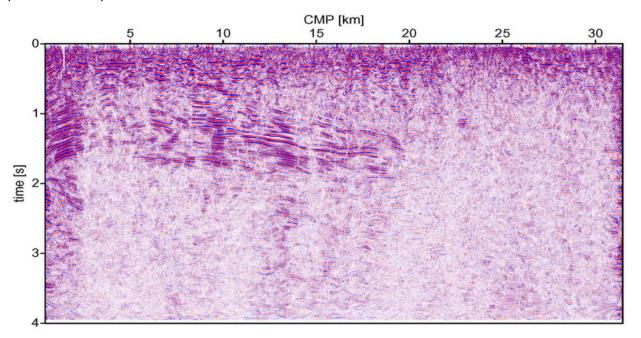


Figura 5.6. Resultado do empilhamento ao afastamento-nulo simulado a partir dos atributos apresentados nas figuras anteriores. Figura tempo vs distância (do CMP da origem da linha). Observa-se a continuidade dos traços na janela 2,0s x 20,0km. As outras áreas não apresentaram destaque importante. Esta seção pode ser visualmente comparada à Figura 4.15.

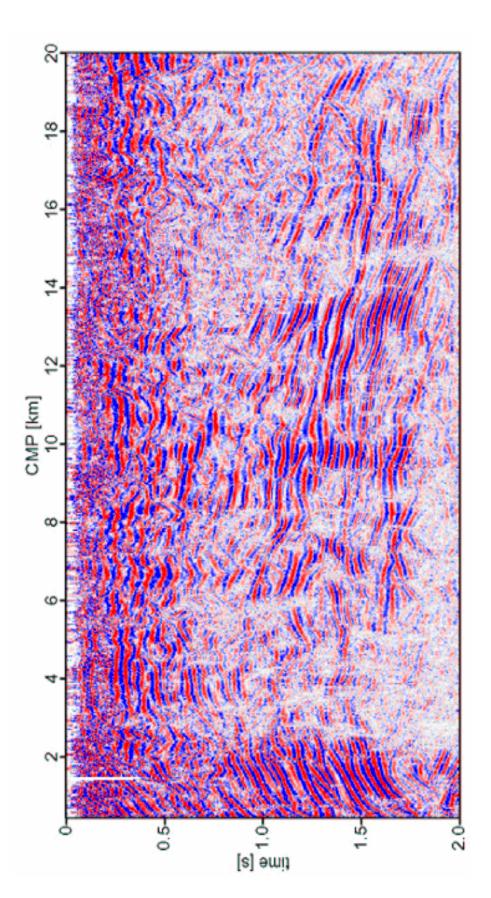


Figura 5.7. Resultado do empilhamento ao afastamento-nulo simulado a partir dos atributos apresentados nas figuras anteriores, onde está destacada a faixa 2,0s x 20,0km para uso na interpretação por delineamento de refletores. Esta seção pode ser visualmente comparada à seção da Figura 4.16.

## 5.2 MARCAÇÃO DE TEMPOS E TOMOGRAFIA

Nesta seção apresentamos resultados da aplicação do sistema Uni3D do WIT/CRS, que é composto dos processos de marcação tempo-distância, tomografia e migração (pré- e pósempilhamento). Os métodos de marcação e migração foram apresentados no Capítulo 3.

A Figura 5.8 representa a marcação automática com edição na seção tempo vs distância do afastamento-nulo simulada da Figura 5.7. Embora o tamanho da figura não contribua muito na análise, observa-se a continuidade traço-a-traço das marcações na seção escolhida. Algumas áreas não permitem maiores destaques de marcação. O arquivo gerado é fundamental para o próximo processo da tomografia, cujo resultado é mostrado a seguir.

A Figura 5.9 representa o modelo de macro-velocidade (MV) usado para o processo de migração apresentados na sequência. A distribuição de velocidade vs tempo-distância (escala em cores, v(x,z)) foi obtida do processo de inversão tomográfica a partir do arquivo gerado pela marcação tempo vs distância mostrada na Figura 5.8. A janela apresentada é puramente espacial de 5,5s x 21,0 km. A migração é totalmente dependente do macro-modelo.

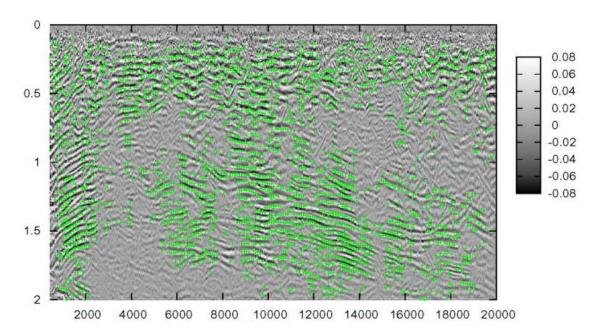


Figura 5.8. Distribuição da marcação automática de tempo vs distância com edição da seção empilhada ao afastamento-nulo da Figura 5.7. Observa-se a continuidade da marcação traço-a-traço (cruzes verdes) na seção escolhida (2s x 20km). As outras áreas não apresentaram um destaque de coerência importante para realização tomográfica. O arquivo gerado é utilizado para o processo de inversão, cujo resultado é mostrado a seguir.

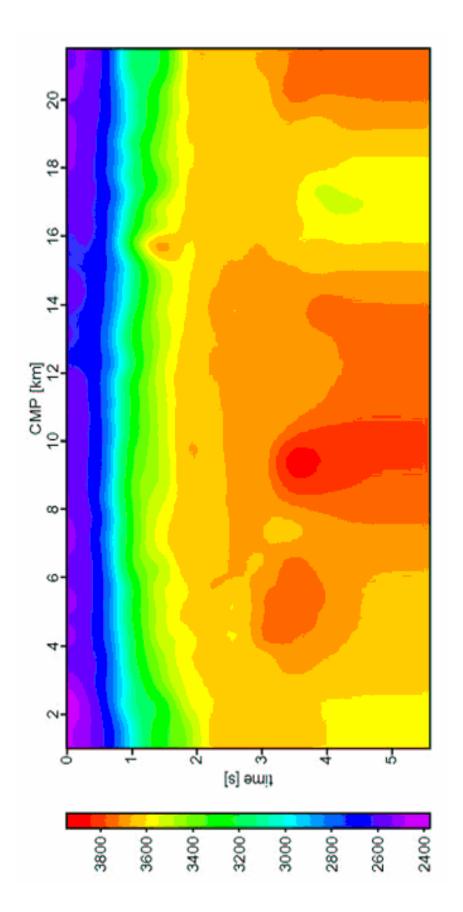


Figura 5.9. Modelo de macro-velocidade. Distribuição de velocidade (escala em cores) vs tempo-distância obtida do processo de inversão a partir do arquivo gerado na marcação tempo vs distância mostrada na Figura 5.8. Janela de 5,5s x 21,0 km. Este modelo é o utilizado na migração obtida na figura posterior.

# 5.3 CORREÇÃO ESTÁTICA RESIDUAL

Nesta seção apresentamos resultados da aplicação do sistema WIT/CRS de correção estática residual (CER) que é um processo pré-empilhamento (KOGLIN, 2005).

A Figura 5.10 representa a seção empilhada completa (4,0s x 31,5km) ao afastamentonulo, simulada a partir da CER com duas iterações. Esta seção é útil para uso parcial na interpretação por delineamento dos refletores e marcação da borda do Graben. A Figura 5.11 representa a correspondente parte janelada a 2,0s x 20,0km para uso na interpretação detalhada de delineamento geométrico de refletores.

Comparando estas seções com as seções NMO (Figura 4.16) e CRS (sem CER da Figura 5.7), podemos observar que houve um acréscimo de resolução com a aplicação da CER, medido pela continuidade de refletores, e conseqüente melhor relação sinal/ruído. Com relação à Figura 5.11, observa-se uma melhor continuidade no delineamento dos refletores superiores.

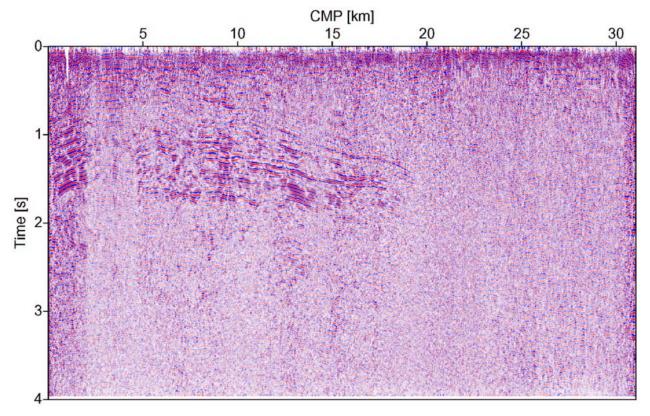


Figura 5.10. Resultado da seção empilhada completa ao afastamento-nulo simulada a partir da correção estática residual (CER) após duas iterações. Esta seção serve para uso na interpretação por delineamento de refletores. Esta seção pode ser visualmente comparada à seção das Figuras 4.16 e 5.7. O mergulho geral e o traçado anticlinal estão bem claros. A indicação é que o Graben está limitado à direita à abscissa de 20km, e na ordenada a 2s.

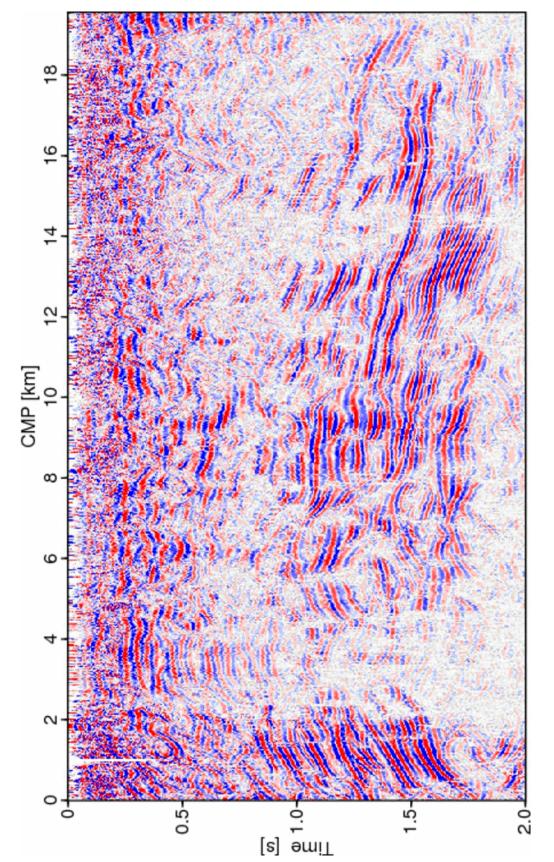


Figura 5.11. Seção janela da seção anterior empilhada ao afastamento-nulo com CER de duas iterações. Esta seção serve para uso na interpretação por delineamento de refletores. Esta seção pode ser visualmente comparada à seção das Figuras 4.17 e 5.9. Observa-se uma continuidade maior no delineamento dos refletores, e conseqüentemente uma melhor relação sinal/ruído.

# 5.4 MIGRAÇÃO

As seções das Figuras 5.12 e 5.13 representam os resultados da migração Kirchhoff, respectivamente, pré- e pós-empilhamento à profundidade obtidas a partir de dados pré- empilhados com correção estática residual e do modelo de macro-velocidades da Figura 5.9, sendo a janela de destaque em ambas as figuras de 5,0km x 20,0km. Estas figuras auxiliaram as interpretações por delineamento de refletores do capítulo seguinte. Para isto foi conveniente colocar o eixo horizontal e o vertical na mesma escala para que não houvesse deformação visual da geometria dos refletores.

A análise visual permite traçar refletores cuja continuidade tem baixa resolução, sendo que a resolução do pós-empilhamento se apresenta melhor do que o caso pré-empilhamento. Aparentemente, migração pré-empilhamento resolve de forma mais eficiente as estruturas mais profundas, enquanto a migração pós-empilhamento, as estruturas mais rasas. As melhores seções, onde estruturas possam ser delineadas, serão compostas no Capítulo Conclusões Gerais.

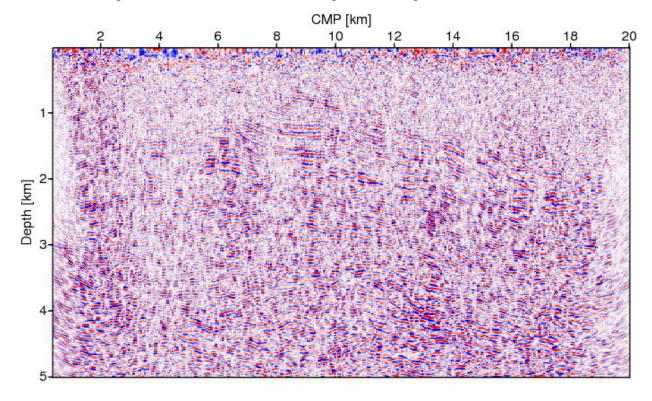


Figura 5.12. Seção migrada pré-empilhamento (sem CER) à profundidade obtida a partir do modelo de macro-velocidades de figura anterior. A janela de destaque é 5,0km x 20,0km para uso na interpretação por delineamento de refletores. A análise visual permite traçar refletores cuja continuidade tem baixa resolução.

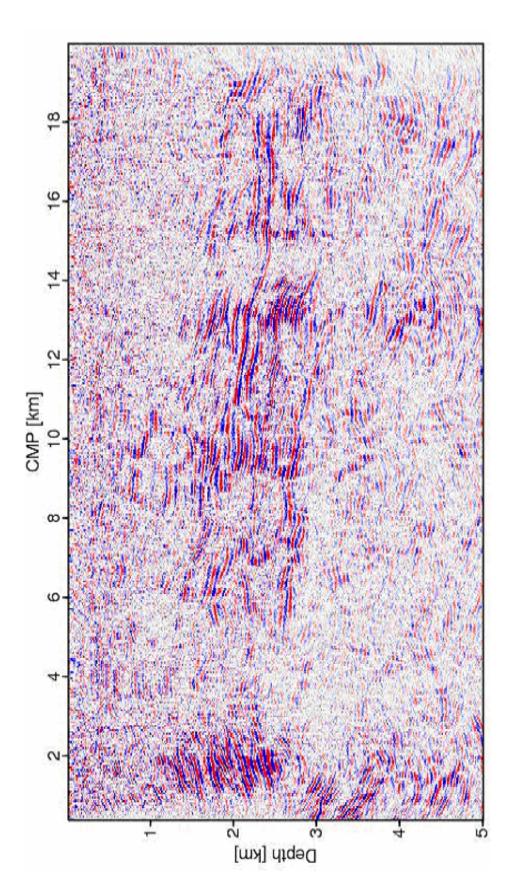


Figura 5.13. Seção migrada pós-empilhamento (sem CER) à profundidade obtida a partir do modelo de macro-velocidades de figura anterior. A janela de destaque é 5,0km x 20,0km para uso na interpretação por delineamento de refletores. A análise visual permite traçar refletores cuja continuidade melhor resolução do que o caso pré-empilhamento.

### 6 CONCLUSÕES GERAIS

Algumas conclusões já foram estabelecidas em seções específicas dos capítulos anteriores como, por exemplo, quanto ao silenciamento, filtragens F e F-K, análise de velocidade, correção estática residual, inversão e migração. Aqui procuramos enfatizar a interpretação geométrica de estruturas nas seções ZO e migradas.

As seções a serem interpretadas são dependentes da forma de ganho dinâmico e da coloração aplicada. Além disso, é comum a todas as figuras que o exagero vertical, expresso por  $E_V = 2/v$ , diminua com a profundidade devido ao aumento de velocidade.

Nas figuras que se seguem, foram traçados três tipos de linhas: (1) Linhas subhorizontais representando refletores; (2) linhas sub-verticais representando descontinuidades; e (3) linhas curvas representando sinclinais ou anticlinais.

O método CRS utiliza um operador de empilhamento 2D que admite um número de traços (considere-se que seja da forma  $\approx N^2$ ) maior do que o operador convencional NMO/DMO (como referência  $\approx N$ ). Como resultado desta estratégia, o ajuste conta com uma maior coerência dos eventos registrados nas janelas de empilhamento (Fresnel e não Fresnel) dos dados préempilhados.

O operador NMO utiliza o modelo de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces planas. O operador DMO utiliza o modelo de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces inclinadas. O operador CRS utiliza o modelo de camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces curvas. Sendo assim, o modelo utilizado fica mais robusto no sentido NMO-CRS, enquanto que os algoritmos ficam mais complicados. Isto se deve ao fato do operador CRS considerar as curvaturas locais dos refletores, em vez de tratá-los como se fossem compostos de pontos (difrações) ou segmentos com uma forma fixa (semi-círculos).

O processamento CRS, realizado com o sistema WIT/CRS mostrou resultados coerentes com a qualidade dos dados, no que se refere à seção empilhada e aos atributos determinados. Foram detectadas diferenças significantes em comparação ao resultado do empilhamento NMO/DMO em dois parâmetros de avaliação: (1°) O aumento na continuidade traço-a-traço dos eventos; e (2°) um aumento na relação sinal/ruído. Além disso, constatou-se também, uma pequena evolução no empilhamento CRS após a correção estática residual (CER) com relação a estes dois parâmetros de avaliação.

Os modelos de macro-velocidades (MV) obtidos por inversão tomográfica podem ser controlados por informação a priori, o que significa determinar o modelo de velocidade usando a informação da subsuperfície. Entre os painéis ZO e MV, é necessário se aplicar uma rotina de marcação automática assistida para se obter uma tabela editável de valores tempo-distância de entrada à rotina de inversão sobre a seção ZO obtida do empilhamento CRS. O resultado da tomografia é a função v(x,z) (distribuição de velocidade, modelo de macro-velocidade) resgatada para uma distribuição de velocidades 2D que deve estar coerente com as informações a priori ditadas pela geologia.

Os dados sísmicos do Graben do Tacutu são caracterizados pelo alto nível de ruído, e por esta razão muitos conjuntos FC e RC foram silenciados. Posteriormente, como um resultado da análise visual de todos os conjuntos FC, muitos traços individuais foram zerados devido a efeitos como impulsos, desvio térmico dos receptores e ruído localizado.

Destaca-se a importância do pré-processamento nos resultados dos empilhamentos NMO/DMO/CRS e processamentos subsequentes. Não foi aplicada a correção estática baseada no SU devido a suave topografia do platô do Tacutu. A deconvolução ao impulso foi aplicada aos dados, porém os resultados subsequentes não tiveram uso devido a sua baixa qualidade (seções FC muito ruidosas e seções empilhadas apresentando baixa razão sinal/ruído).

No que tange ao processamento convencional, a natureza desta dissertação nos permitiu realizar muitos dos processos que fazem parte das rotinas de processamento utilizadas no dia-adia da industria do petróleo. Contudo, por motivos apresentados anteriormente, alguns deles não fizeram parte desta dissertação, o que não afasta a possibilidade de que a sua inclusão pudesse vir a melhorar a qualidade dos resultados aqui obtidos, sobretudo na fase de pré-processamento.

A partir da Figura 5.10, a Figura 6.1 representa a seção interpretada da seção empilhada CRS completa ao afastamento-nulo simulada a partir da correção estática residual (CER) após duas iterações. Observou-se um ganho de resolução nesta seção medida, principalmente, através da continuidade dos refletores, o que auxilia no traçado geométrico das estruturas. O objetivo desta seção é estabelecer as bordas do Graben do Tacutu e suas linhas estruturais principais. Sendo assim, se delimita a borda SE do Graben com uma descontinuidade forte na posição aproximada do quilômetro 20 ao longo da linha GH.. A linha está contida totalmente dentro do Graben. No eixo tempo, o Graben parece limitado à cota de 2,0 s. Múltiplas externas não parecem evidentes. Além da abscissa de 20,0 km, estruturas rasas sub-horizontais são notáveis entre 0,0 s e 0,5 s. Não foram realizados testes procurando verificar inversão de velocidade no

empilhamento; consequentemente surgem formas convexas, chamadas de anticlinais, e côncavas, chamadas de sinclinais. Analisando as estruturas entre 1,0 s e 2,0 s (triângulo EFG), observamos a forma convergente dos refletores, a qual pode ser interpretada para o pacote como resultante de superfícies de descontinuidades.

Analisando a Figura 6.2, a faixa de 0 a 0,5 s (linha AB) é caracterizada pelo comportamento horizontalizado dos refletores, mas com descontinuidades verticais. Considerando uma velocidade média de 2700 m/s (segundo a Figura 5.9), o nível inferior corresponde a uma profundidade de 1350 m, e estas estruturas podem fazer parte da Formação Tucano. Observamos que ao longo da linha AB se estabelece uma forte descontinuidade, e ao redor do km 10 e do tempo 0,5 s, se estabelece um refletor (linha EF) que mergulha para a direita até 1,4s na cota de 20,0 km, e admitimos como corresponder à base da Formação Tacutu. O embasamento foi traçado aproximadamente na cota de 2,0 s ao longo da linha curva CD.

A Figura 6.3 resulta da interpretação sobre a Figura 5.13 da seção migrada em profundidade, tipo Kirchhoff, pós-empilhamento CRS com CER, otimizado e Fresnel. O objetivo desta seção é comparar a interpretação por delineamento de estruturas da Figura 6.1, esta seção apresenta deformação de escala 2:1. Informações de outras seções são utilizadas no traçado geométrico das estruturas delineadas que visam demonstrar a dinâmica do Graben do Tacutu. Esta seção migrada permite desenhar refletores presentes nos parágrafos anteriores (Figuras 6.1 e 6.2), no entanto, a atitude dos refletores são notadamente diferentes por se apresentarem mais contínuos e mais horizontalizados.

Como conclusão maior, gostaríamos de ter condições de propor uma localização para a próxima perfuração de petróleo nesta área estudada. No entanto, seria interessante para isto reprocessar criticamente todos os dados coletados na área do Tacutu, incluindo os dados de poço, o que foge às finalidades acadêmicas presentes.

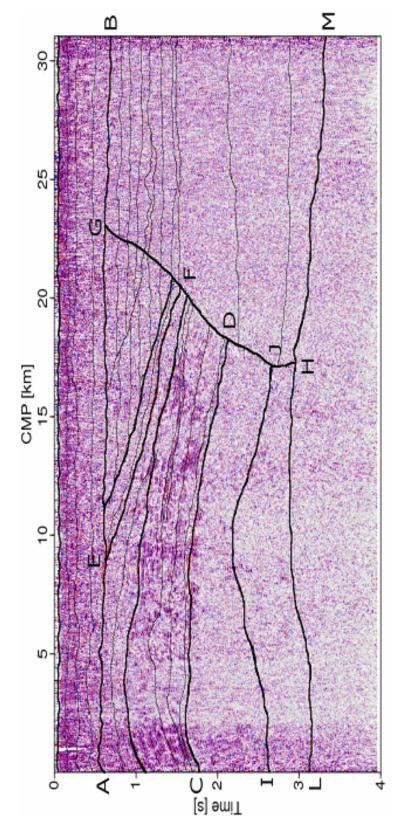


Figura 6.1. Seção interpretada a partir da Figura 5.10 da seção empilhada CRS completa ao afastamento-nulo simulada a partir da correção estática residual (CER) após duas iterações. A ser comparada com as Figuras 6.2 e 6.3.

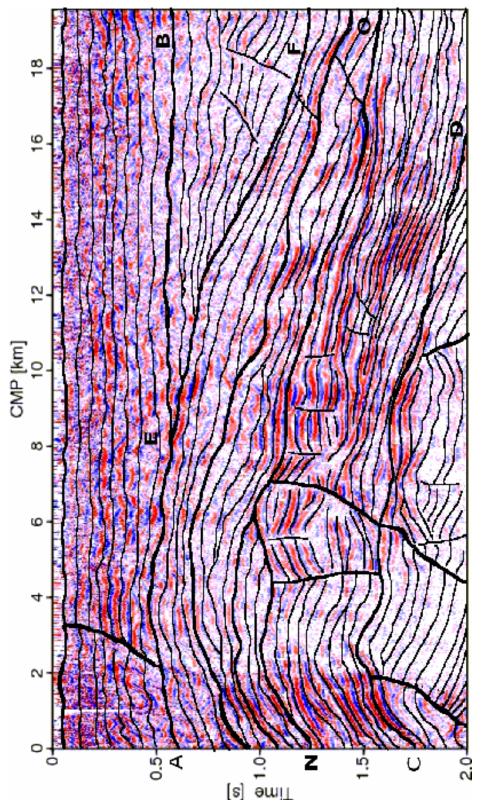


Figura 6.2. Seção interpretada a partir da Figura 5.11 da seção Empilhamento CRS (ZO com CER), otimizado e Fresnel limitado à janela 2,0 s x 20,0 km. A interpretação realizada é de delineamento de estruturas. Informações de outras seções são consideradas no traçado geométrico das estruturas delineadas que visam demonstrar a dinâmica do Graben do Tacutu.

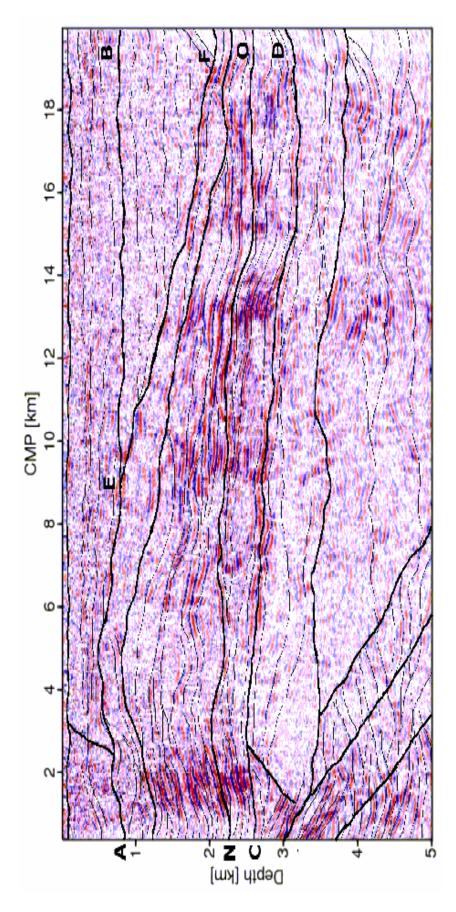


Figura 6.3. Seção interpretada a partir da seção migrada em profundidade tipo Kirchhoff (Figura 5.13), pós-empilhamento, resultante do empilhamento CRS (ZO com CER), otimizado e Fresnel. Interpretação por delineamento de estruturas com pouca deformação de escala de 2:1. Informações de outras seções são consideradas no traçado geométrico das estruturas delineadas que visam demonstrar a dinâmica do Graben do Tacutu.

### REFERÊNCIAS

AKI, K.; RICHARDS, P. *Quantitative seismology-theory and methods.* New York: W. H. Freeman and Company, 1980. v. 1.

BERGLER, S. Common-Reflection-Surface stack and attributes. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 7., 2001. *Extended abstracts.*, [S. 1.]: SBGf, 2001.

BURNETT, C. R.; HIRSCHBERG, J. G.; MARK, J. E. *Diffraction and interference*: New York: McGraw-Hill, 1958. Part 6, chap. 5, p. 6. 81-4 (Handbook of Physics).

CERVENY, V. The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures: seismic shear waves. [S. 1.]: Geophysical Press, 1985. Part A: Theory.

CERVENY, V.; MOLOTKOV, I. A.; PSENCIK, I. Ray method in seismology. Praga: Universidade de Karlova, 1977.

DURBAUM, H. Zur bestimmung von wellenge-schwindigkeiten reflexionxseismichen messungen: *Geophysical Prospecting*, v. 2, p. 151-167, 1954.

DUVENECK, E. Tomographic velocity model inversion with CRS attributes: *Annual WIT report*. p. 92-106, 2002.

EIRAS, J. F.; KINOSHITA, E. M. Geology and petroleum perspectives of the takutu basin. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. *Origen and evolution of sedimentary basins*. [S. l.: s. n.], 1990. p. 97-220.

GAZDAG, J. Wave-equation migration by phase shift: *Geophysics*, v. 43, p. 1342-1351, 1978.

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

GIERSE, G.; PRUESSMANN, J.; LAGGIARD, E.; BOENNEMANN, C.; MEYER, H. *Improved imaging of 3d marine seismic data from off-shore Costa Rica with CRS processing*: first break, v. 21, n. 12, p. 45-49. 2003.

HEILMANN, Z.; MANN, J.; DUVENECK, E.; HERTWECK, T. *Crs*-stack-based seismic reflection imaging a real data example: In: EAGE CONFERENCE AND EXHIBITION, 66., 2004, Paris, France. *Extended Abstracts*. Paris, France [s. n.], 2004.

HUBRAL, P. H. W. *Interval velocities from seismic reflection time measurements*. Houston: SEG Publishing. 1980.

HUBRAL, P. H. W. Macro-model independent seismic reflection imaging: *Journal of Applied Geophysics*, v. 42, n. 3, p. 4-18, 1999. Special issue.

HUBRAL, P. et al. Determination of Fresnel zones from traveltime measurements. *Geophysics*, v. 58, n. 5, p. 703-712, 1993.

JÄGER, R.; MANN, J.; HOCHT, G.; HUBRAL, P. Common-reflection-surface stack: image and attributes. *Geophysics*, v. 66, n. 1, p. 97-109, 2001.

KNAPP, R.; STEEPLES, D. High-resolution Common-Depth-Point Seismic reflection Profiling: Instrumentation. *Geophysics*, v. 51, n. 2, p. 276-282, 1986.

KOGLIN, I. Estimation of residual static time shifts by mean of the crs\_based residual static correction approach. Berlin: Logos Verlag, 2005.

MANN, J. Common-reflection-surface stack: User's manual to version 4.2: Karlsruhe: Geophysical Institute. University of Karlsruhe, 2001.

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

MANN, J.; JÄGER, R.; MÜLLER, T.; HÖCHT, G.; HUBRAL, P. Common-Reflection-Surface Stack: a Real Data Example. *Journal of Applied Geophysics*, v. 42, n. 3, 4, p. 301-318. 1999. Edição Especial.

MAUCH, R. *Coherency analysis of seismic data*. Karlsruhe: Universidade de Karlsruhe, Alemanha, 1999. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade de Karlsruhe, 1999.

MÜLLER, T. The Common-Reflection-Surface stack method: seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model. Der andere Verlag, Bad Iburg. 1999.

NEIDELL, N. S; TANER, M. T. semblance and other coherency measures for multichannel data: *Geophysics*, n. 36, p. 498-509, 1971.

NEWMAN, P. Divergence effects in a layered earth: Geophysics, v. 38, n. 3, p. 481-488, 1973.

OLHOVICH, V. A. The causes of noise in seismic reflection and refraction work. *Geophysics*. n. 29, p. 1015-1030, 1964.

PETERSON, D; MIDDLETON, D. Sampling and reconstruction of wave-number limited function in n-dimensional eucliddean spaces: Information and Control. [S. 1.: s. n.], 1962. v. 5, p. 279-323.

SCALES, J. A; SNIEDER, R. K. What is noise?. *Geophysics*, v. 63, p. 1122-1124, 1998.

SCHLEICHER, J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophysical Prospecting*. v.41, p. 495-513, 1993.

SGUAZZERO, P; VESNAVER, A. A comparative analysis of algorithms for stacking velocity estimation: deconvolution and inversion. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1987.

SHARPE, J. A. *The production of elastic waves by explosion pressures*: Part I. Theory and Empirical Field Observations. Los Angeles: Spring meeting, 1942.

SHARPE, J. A. *The production of elastic waves by explosion pressures*: Part II. Results of Observations Near an Exploding Charge. Houston: Spring meeting, 1941.

SHERIFF, R. E. Factors affecting seismic amplitudes: *Geophysical Prospecting*. v. 23, p. 125-138, 1975.

SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration seismology*. Cambridge: Cambridge University Press. V. 1 e 2, 1982.

SHERIF, R.; GELDART, L. *Exploration seismology*: history, theory and data acquisition. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. V. 6.

STOCKWELL, J. W.; COHEN, J. K. *The new SU user's manual. version 3.2.* Colorado: Center for Wave Phenomena, Colorado Scholl of Mines, 2002.

TANER, M. T.; KOEHLER, F.; ALHILALI, K. Estimation and correction of near-surface time anomalies. *Geophysics*, v. 39, n. 4, p. 441-463, 1974.

TYGEL, M. et al. Eigenwave based multiparameter traveltime expansions. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 67., 1997. Texas. *Expanded abstracts*. Texas: Soc. Expl. Geophysics, 1997. p. 1770-1773.

VERMEER, G. Seismic wavefield sampling: a wave number approach to acquisition fundamentals. [S. l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1999. (Geophysical References, v. 4).

ZIOLKOWSKI, A; FOKKEMA, J.T. Tutorial. The progressive attenuation of high-frequency energy in seismic reflection data: *Geophysical Processing*. v. 34, p. 981-1001, 1986.