

ANDRÉ LUÍS BARRETO GERHARDT

ASPECTOS DA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE
DADOS SÍSMICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Setembro de 1998

ANDRÉ LUÍS BARRETO GERHARDT

ASPECTOS DA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE
DADOS SÍSMICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Marcelo Gattass

Co-orientador: Prof. Luiz Fernando
Martha

Rio de Janeiro

1998

Agradecimentos

No decorrer deste trabalho tive a oportunidade de conviver com diversas pessoas que contribuíram para a sua conclusão e para as quais desejo deixar registrada a minha gratidão.

Ao orientador Prof. Marcelo Gattass, cujo apoio e ajuda em identificar e compreender tópicos importantes foram de importância fundamental. Ao Prof. Luiz Fernando Martha pelo seu apoio no decorrer do curso e pela assistência especial em assuntos formais junto ao Departamento. Ao Prof. Paulo Cezar Carvalho pelas discussões e sugestões sobre diversos outros temas estudados ao longo do curso.

Agradecimento especial aos colegas Anselmo Paiva e Ana Elisa Schmidt, sem o apoio dos quais algumas partes deste trabalho não teriam sido realizadas.

À Carolina Alfaro pela criteriosa revisão do texto final. Ao colega Adelson Santos pela revisão do capítulo de sísmica.

A todos os funcionários da PUC-Rio com quem tive contato, em especial à Ana Roxo pelo seu apoio em questões burocráticas junto ao Departamento.

À Petróleo Brasileiro S.A. pelo suporte financeiro e à PUC-Rio pela oportunidade de ter participado de seu quadro de alunos.

Por último, mas não em menor grau, à minha esposa Liliane e à minha mãe Maria Helena, que garantiram apoio espiritual e logístico irrestrito, além de enorme compreensão. A elas também registro o meu eterno débito de gratidão por tudo que continuamente me ensinam sobre a vida.

Resumo

A visualização volumétrica direta (*volume rendering*) aplicada a dados sísmicos é uma técnica ainda emergente. Apenas recentemente alguns *software* comerciais tornaram-se disponíveis para a indústria de petróleo. Comparado ao método tradicional de interpretação sobre seções bidimensionais, essa técnica representa uma alternativa interessante que possibilita investigar o volume de dados na sua totalidade, dessa forma permitindo um melhor entendimento da geologia estrutural e da estratigrafia da subsuperfície.

Este trabalho analisa diversos aspectos da natureza dos dados sísmicos e da forma como eles afetam os resultados obtidos pelas técnicas de visualização volumétrica direta tradicionalmente empregadas. Três aspectos são discutidos em maior detalhe: quantização das amplitudes medidas para representação digital de 8-bit, segmentação do volume e modelos de iluminação.

O impacto da quantização é analisado experimentalmente utilizando diferentes algoritmos de quantização de cor adaptados para tratar com amplitudes. A quantização uniforme é selecionada pela sua simplicidade e eficiência.

A segmentação dos eventos sísmicos é analisada teoricamente e verificada experimentalmente. São discutidas diversas características dos dados sísmicos que restringem o sucesso da segmentação.

A validade da aplicação aos dados sísmicos de modelos de iluminação local comumente empregados em visualização volumétrica é analisada teoricamente. A estimativa dos vetores normais diretamente a partir dos valores de amplitude representa uma alternativa inadequada.

Por fim, é identificada uma série de requisitos aos quais um sistema deve atender para que a visualização volumétrica de dados sísmicos seja bem sucedida.

Abstract

Volume rendering is an emerging technique in the field of seismic data visualization. Only recently commercial software has been made available to the oil industry. Volume rendering is particularly useful for understanding structural and stratigraphic features present in seismic data in a more natural way than using the traditional method of interpreting over a set of 2D slices.

This work addresses several topics related to the nature of seismic data and to how they interrelate with techniques commonly used in volume rendering. Special attention is given to three topics: quantization of acquired seismic amplitudes to 8-bit representations, segmentation techniques to highlight seismic events and use of illumination models.

The quantization effects are analyzed by applying different color quantization algorithms adapted to handle seismic amplitudes. Uniform quantization is selected due to its simplicity and efficiency.

The segmentation of seismic events is studied theoretically and verified experimentally. Several characteristics of seismic data that prevent segmentation from being successful are discussed.

The significance of shading obtained by applying common illumination models is studied theoretically. The estimation of normal vectors directly from amplitude values is shown to be inadequate.

Finally, several basic requisites to be fulfilled by seismic data volume visualization algorithms are identified.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.2 Organização.....	12
2 MÉTODO SÍSMICO	14
2.1 Aquisição de dados	19
2.2 Processamento sísmico.....	25
2.2.1 Deconvolução	25
2.2.2 Análise de velocidades e empilhamento	26
2.2.3 Migração.....	30
2.3 Interpretação	33
3 TRABALHOS ANTERIORES	36
3.1 Tomografia de raios-X (CT).....	36
3.2 Ressonância magnética (MRI).....	37
3.3 Tomografia de emissão de pósitrons (PET).....	37
3.4 Ultra-sonografia 3D	38
3.5 Sísmica 3D	40
4 VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA.....	43
4.1 Métodos baseados em superfícies	43
4.2 Métodos diretos.....	45
4.2.1 Reconstrução volumétrica	48
4.2.2 A equação de visualização volumétrica direta	51
4.2.2.1 Determinação da radiância de uma amostra	55
4.2.3 Estimativa do vetor normal.....	58

4.2.4 Classificação dos algoritmos de visualização volumétrica direta.....	60
4.2.4.1 Ordem da imagem	61
4.2.4.2 Ordem do objeto	63
4.2.4.2.1 Algoritmos baseados em mapeamento de texturas	65
4.2.4.3 Algoritmos híbridos	66
4.2.4.4 Métodos baseados em transformação de domínios	68
5 REQUISITOS DOS DADOS SÍSMICOS.....	69
5.1 Quantização	69
5.1.1 Algoritmo de populosidade.....	75
5.1.2 Algoritmo de corte mediano	76
5.2 Segmentação	79
5.2.1 Atribuição de opacidades.....	79
5.2.2 Extração de superfícies	82
5.3 Estimativa dos vetores normais.....	86
5.3.1 Efeito da variação de amplitude.....	86
5.3.2 Efeito da natureza ondulatória dos dados	87
5.4 Resumo do capítulo.....	89
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	90
6.1 Proposta de trabalhos futuros	92
REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA.....	94
OBRAS CONSULTADAS	99

Lista de figuras

FIGURA 2.1 - EXEMPLO DE ACUMULAÇÃO DE HIDROCARBONETOS.....	15
FIGURA 2.2 - PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM TRAÇO SÍSMICO	17
FIGURA 2.3 - PRINCÍPIO DA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS.....	20
FIGURA 2.4 - REGISTRO SÍSMICO 2D TERRESTRE.	22
FIGURA 2.5 - GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO CMP.....	24
FIGURA 2.6 - ETAPAS FUNDAMENTAIS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO QUE PRECEDEM O EMPIHAMENTO.	28
FIGURA 2.7 - ANÁLISE DE VELOCIDADES	29
FIGURA 2.8 - EFEITO DA MIGRAÇÃO.	31
FIGURA 2.9 - RELAÇÃO ENTRE NMO, DMO E MIGRAÇÃO.	32
FIGURA 3.1 - APARÊNCIA DA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE DADOS DE ULTRA-SONOGRAFIA 3D.....	40
FIGURA 4.1 - PIPELINE DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DIRETA.....	46
FIGURA 4.2 - EXEMPLOS DE CLASSIFICADORES DE OPACIDADE.....	47
FIGURA 4.3 – REAMOSTRAGEM AO LONGO DE UMA LINHA DE VISADA.	50
FIGURA 4.4 - RAIO QUE CALCULA A COR DE UM PIXEL.....	51
FIGURA 4.5 - MODELO DE ABSORÇÃO.....	52
FIGURA 4.6 - VETORES USADOS NO MODELO DE REFLEXÃO DE PHONG.	57
FIGURA 4.7 - OPERADORES DE DIFERENÇAS FINITAS.	59
FIGURA 4.8 - ALGORITMO RAY-CASTING.	62
FIGURA 4.9 - ALGORITMO SPLATTING.	64
FIGURA 4.10 - ESQUEMA DO ALGORITMO TEXTURE-MAPPING.....	65
FIGURA 4.11 - ESQUEMA DO ALGORITMO SHEAR-WARP FACTORIZATION.	67
FIGURA 5.1 - QUANTIZADOR UNIFORME TIPO MIDRISE.....	70
FIGURA 5.2 - REDUÇÃO DA FAIXA DINÂMICA DEVIDO À QUANTIZAÇÃO.	71
FIGURA 5.3 - MISTURA DE INFORMAÇÕES DEVIDO À QUANTIZAÇÃO.	72
FIGURA 5.4 - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA PARA DIFERENTES REPRESENTAÇÕES DE DADOS...	73

FIGURA 5.5 - IMAGENS GERADAS PELO ALGORITMO <i>RAY-CASTING</i> UTILIZANDO REPRESENTAÇÃO DE DADOS DE PONTO-FLUTUANTE E DE 8-BIT.....	74
FIGURA 5.6 - DISTRIBUIÇÃO DE AMPLITUDES DOS DADOS ORIGINAIS E APÓS A APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE QUANTIZAÇÃO UNIFORME, POPULOSIDADE E CORTE MEDIANO.....	77
FIGURA 5.7 - IMAGENS GERADAS COM <i>RAY-CASTING</i> A PARTIR DOS DADOS ORIGINAIS UTILIZANDO OS ALGORITMOS DE QUANTIZAÇÃO UNIFORME, POPULOSIDADE E CORTE MEDIANO.	78
FIGURA 5.8 - IMAGEM CONFUSA RESULTANTE DA INCAPACIDADE DE INDIVIDUALIZAR EVENTOS SÍSMICOS UTILIZANDO VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DIRETA.....	80
FIGURA 5.9 - SENSIBILIDADE DA IMAGEM FINAL À PARAMETRIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	81
FIGURA 5.10 - EXEMPLO DE FEIÇÃO SÍSMICA ESTRATIGRÁFICA DE DIFÍCIL TRATAMENTO UTILIZANDO A TÉCNICA DE VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DIRETA.....	83
FIGURA 5.11 – IMAGEM OBTIDA COM O ALGORITMO <i>MARCHING CUBES</i>	84
FIGURA 5.12 - SEÇÃO SÍSMICA COM ANOMALIAS DE AMPLITUDE.	85
FIGURA 5.13 - RELEVO DEFINIDO PELO MAPEAMENTO DAS AMPLITUDES SÍSMICAS SOBRE UMA INTERFACE PLANA HORIZONTAL.	87
FIGURA 5.14 - DIFERENÇA ENTRE OS VETORES NORMAIS ESTIMADOS DIRETAMENTE A PARTIR DAS AMPLITUDES SÍSMICAS E O VETOR NORMAL VERDADEIRO DE UM HORIZONTE SÍSMICO.	88

1 Introdução

O objetivo da visualização científica é extrair informações relevantes de um conjunto de dados utilizando representações gráficas interativas, auxiliando o intérprete na formação de uma imagem mental dos dados. A visualização volumétrica é uma combinação de técnicas e processos que gera imagens a partir de dados que representam campos escalares em domínios tridimensionais.

A maioria dos levantamentos sísmicos atuais é tridimensional, favorecendo um melhor entendimento da geologia do subsolo. Entretanto, a representação gráfica dos dados sísmicos assim adquiridos tem sido feita tipicamente na forma de seções bidimensionais da subsuperfície.

A visualização volumétrica é uma ferramenta útil para a análise e interpretação preliminar de dados sísmicos tridimensionais. Sua aplicação auxilia na identificação de feições estruturais ou estratigráficas que possam estar relacionadas com acumulações de hidrocarbonetos. A sua grande vantagem está em permitir um entendimento da subsuperfície de uma forma muito mais natural e integrada do que utilizando um conjunto de seções bidimensionais. Empregando a técnica de visualização volumétrica direta (*direct volume rendering*), o intérprete pode enfatizar subvolumes específicos dos dados a fim de melhor compreender sua distribuição espacial. Com ela também é possível superpor múltiplos volumes de diferentes atributos sísmicos a fim de obter uma maior integração entre os dados.

Existem diversos métodos de visualização aplicados a técnicas de investigação médica. Entretanto, a aplicação de visualização volumétrica direta em interpretação sísmica está limitada atualmente a uma etapa preliminar da análise dos dados. A complexidade intrínseca da visualização de dados sísmicos é comparável à da ultra-sonografia, cujo estado-da-arte é o menos desenvolvido dentre as técnicas médicas. Os dados sísmicos apresentam peculiaridades que devem ser levadas em conta para que a visualização volumétrica seja bem sucedida.

1.1 Objetivos

Este trabalho analisa alguns aspectos da natureza dos dados sísmicos que levam a requisitos básicos de visualização volumétrica aplicada.

Os dados sísmicos tridimensionais são organizados segundo uma matriz de dados S que armazena o valor de amplitude nos nós de uma malha regular tridimensional $S(x,y,z)$, definida pela interseção de planos ortogonais denominados *inlines*, *crosslines* e *time-slices*. Cada amplitude nessa malha está associada a um *voxel*, ou *volume element* - análogo tridimensional de um *pixel* -, que é uma região uniforme de valor constante ao redor de cada ponto em S . Cada *voxel* é um prisma retangular, centrado nos nós da malha, com seis faces, doze arestas e oito vértices. Outra representação bastante empregada considera os *voxels* elementos adimensionais localizados nas coordenadas (x,y,z) da malha, ou seja, os próprios valores $S(x,y,z)$.

Inicialmente, os dados sísmicos são adquiridos em representação digital de ponto-flutuante. Entretanto, a grande maioria dos algoritmos de visualização trabalha com volumes em representação de 8-bit. A redução da representação (quantização), necessária para acomodar os dados sísmicos a esses algoritmos, pode introduzir artefatos indesejáveis e conduzir a resultados imprecisos.

A técnica de visualização volumétrica direta utiliza semitransparências, mapeadas sobre o volume de dados, definidas por uma função de opacidades ou função de transferência. A parametrização desta função não é uma tarefa fácil para o intérprete. Ao contrário das aplicações em medicina, não existem padrões confiáveis de opacidade aplicáveis aos dados sísmicos. A faixa de valores que compõem um evento sísmico pode variar de área para área, dentro do mesmo volume de dados ou ao longo do próprio evento, tornando a parametrização uma tarefa baseada exclusivamente em tentativa e erro. Uma grande interatividade neste processo é desejável, uma vez que a imagem final tende a ser extremamente sensível a pequenas mudanças na função de transferência.

Uma característica importante da visualização volumétrica de dados sísmicos é o significado físico da imagem resultante. As amplitudes medidas pelo método sísmico estão mais relacionadas com a variação das litologias do que com elas próprias. Cada amplitude do

espaço tridimensional está relacionada a uma variação de propriedades do meio de propagação das ondas elásticas que corresponde à derivada da impedância acústica. A cor de cada *pixel* na imagem final é apenas o mapeamento desta informação, sem qualquer evidência sobre sua localização no espaço. Entretanto, o objetivo das imagens é fornecer indicações que permitam extrair informações sobre a estruturação das diversas camadas geológicas da subsuperfície. Para isto é importante o uso de um modelo de iluminação que acentue a percepção tridimensional na imagem final através da tonalização das cores utilizadas para representar as amplitudes. Os modelos de iluminação utilizados em técnicas convencionais de visualização volumétrica direta se baseiam na estimativa dos vetores normais, cuja obtenção passa por uma etapa de segmentação que é fortemente influenciada pela natureza ondulatória dos dados.

Finalmente, cabe lembrar que as condições de aquisição de campo em sísmica são muito menos controladas que as encontradas nos laboratórios médicos. Como consequência, os dados sísmicos são mais suscetíveis a ruídos.

Todos esses fatores sugerem uma série de requisitos que os sistemas de visualização de dados sísmicos devem atender a fim de facilitar a extração de informações relevantes neles presentes.

1.2 Organização

O Capítulo 2 traz uma descrição sucinta do método sísmico. São discutidos os princípios físicos envolvidos, o significado das observações medidas e as etapas de aquisição, processamento e interpretação de dados sísmicos.

No Capítulo 3 é feita uma rápida revisão das técnicas de investigação em medicina. Dá-se atenção especial à ultra-sonografia 3D e sua relação com dados sísmicos. Os resultados da aplicação de diversas técnicas de visualização obtidos na literatura são analisados a fim de determinar, por analogia, qual a melhor abordagem teórica a aplicar em dados sísmicos. Por fim, os trabalhos anteriores em visualização de dados sísmicos tridimensionais são revistos e criticados.

O Capítulo 4 contém uma revisão da visualização volumétrica, incluindo os processos envolvidos na formação de imagens, as principais técnicas e algoritmos descritos na literatura e sua classificação. Uma atenção especial é dada aos pontos de importância fundamental para dados sísmicos, bem como para os algoritmos usados no decorrer deste trabalho.

O Capítulo 5 trata da maior contribuição deste trabalho. Nele são discutidos com maior profundidade três importantes requisitos de visualização volumétrica de dados sísmicos: quantização, segmentação e estimativa dos vetores normais. São desenvolvidas discussões teóricas sobre a aplicabilidade de diversas técnicas e são apresentados os resultados dos testes práticos.

Finalmente, no Capítulo 6 são traçadas conclusões e propostas pesquisas futuras.

2 Método sísmico

A sísmica de reflexão é uma das principais técnicas de construção de imagens da subsuperfície para a prospecção de hidrocarbonetos. A grande maioria das ocorrências de acumulações de óleo e gás se encontra em rochas sedimentares. Uma rocha sedimentar é formada a partir da acumulação, diagênese e solidificação de sedimentos, podendo ser de origem clástica, química ou orgânica. À medida que os sedimentos vão se empilhando em uma bacia sedimentar, o aumento de pressão ativa os processos físicos, químicos e biológicos de formação de rochas sedimentares que compõem a diagênese, tais como: compactação, cimentação, recristalização, hidratação, lixiviação, ação de bactérias, etc. Garantida uma temperatura adequada, os sedimentos orgânicos podem começar a gerar hidrocarbonetos, sendo então denominados rochas geradoras. Os hidrocarbonetos fluem através de meios permeáveis segundo o fenômeno da migração. Por terem densidades menores que a da água, são por ela deslocados ao encontrar uma via de escape. Se nenhuma trapa é encontrada, acabam por escapar pela superfície da terra. Entretanto, se durante a migração existir uma combinação entre uma rocha capeadora impermeável e um meio poroso, os hidrocarbonetos podem ser trapeados e acumulados para formar um reservatório. Meios porosos típicos são arenitos e calcários, enquanto os selantes mais comuns são camadas de rochas sedimentares não-permeáveis, como os folhelhos.

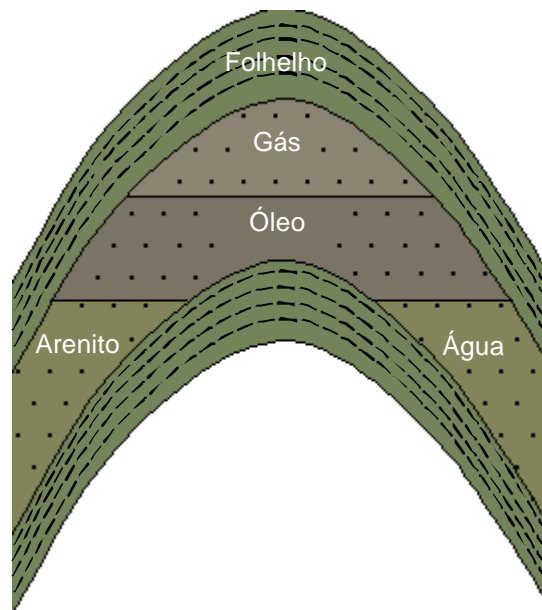


Figura 2.1 - Exemplo clássico de acumulação de hidrocarbonetos em uma estrutura do tipo anticlinal.

A prospecção de óleo e gás é a procura de reservatórios na subsuperfície. Ela pode ser conduzida por métodos diretos, como a perfuração de poços, que custam várias dezenas de milhões de dólares. Apesar de serem necessários para efetivamente explorar as acumulações, os poços fornecem apenas informações pontuais. Outra forma é aplicar métodos indiretos, que são mais baratos e fornecem informações areais ou volumétricas, embora sujeitas a interpretações. Dentre os métodos indiretos mais comuns estão a gravimetria, a magnetometria e a sísmica de refração e de reflexão.

A sísmica de reflexão é o método indireto mais empregado e o que fornece imagens mais precisas da subsuperfície. Seus princípios físicos estão associados com a reflexão de ondas elásticas nas interfaces entre diferentes meios de propagação. É empregada uma fonte sísmica artificial em contato com a superfície para emitir ondas através das camadas rochosas da terra. Na grande maioria dos casos são usadas ondas do tipo *P* (*pressure* - pressão), em que o

deslocamento de partículas é paralelo à direção de avanço da onda em meios isotrópicos¹. A frente de ondas se propaga com uma velocidade entre 300 a 7000 m/s, dependendo do tipo de material, e de forma geral aumenta com a profundidade. Uma interface entre duas litologias encontrada pela frente de ondas ao longo de sua trajetória pode refletir parte da energia de volta à superfície, onde é então registrada por receptores dispostos em arranjos afastados das fontes. O tempo de percurso e a amplitude do campo de ondas são as duas únicas grandezas medidas pelo método.

De forma simplificada, para que a energia seja refletida nas interfaces é necessário que exista um contraste de impedância acústica, definida como o produto da velocidade de propagação pela densidade do meio ($Z = \rho \cdot V$). Este contraste é denominado coeficiente de reflexão ou refletividade, que para a incidência normal de uma onda plana em uma interface é dado por:

$$R_{n+1} = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n}, \quad (2.1)$$

onde n é o índice da camada geológica na coluna estratigráfica. Esta relação é obtida da solução das condições de continuidade da equação que expressa tensão e deslocamento nas interfaces.

Os valores que a relação (2.1) pode assumir variam entre -1.0 e $+1.0$, situações em que há reflexão total da energia incidente. Note-se que um coeficiente de reflexão negativo implica em inversão de fase, ou seja, uma compressão retorna como rarefação (tração). Quando as impedâncias são iguais a refletividade é nula e a interface não é vista pelos métodos sísmicos. A expressão (2.1) não é mais válida quando a incidência deixa de ser normal. Neste caso a energia incidente em uma interface é dividida em componentes de pressão (P) e cisalhamento (S - *shear*)², conforme determinado pelas equações de Knott ou Zoeppritz (Sheriff, 1991).

¹ Um representante clássico deste tipo de ondas é a onda sonora.

² Ondas em que o deslocamento das partículas é perpendicular à direção de propagação. Um exemplo clássico é a onda que se propaga ao longo de uma corda.

A relação (2.1) expressa uma diferença que é essencialmente a derivada da distribuição espacial da impedância acústica. Em uma situação ideal, em que o meio de propagação é totalmente homogêneo e o experimento físico é isento de ruídos, não são registradas quaisquer informações entre as interfaces. Portanto, os dados sísmicos são observações mais relacionadas às diferenças entre os materiais do que a estes próprios.

O conjunto de todos os coeficientes de reflexão presentes em uma coluna estratigráfica é denominado função refletividade. Nela os coeficientes de reflexão são representados como funções delta de Dirac nas posições correspondentes às interfaces a que estão associados (Figura 2.2).

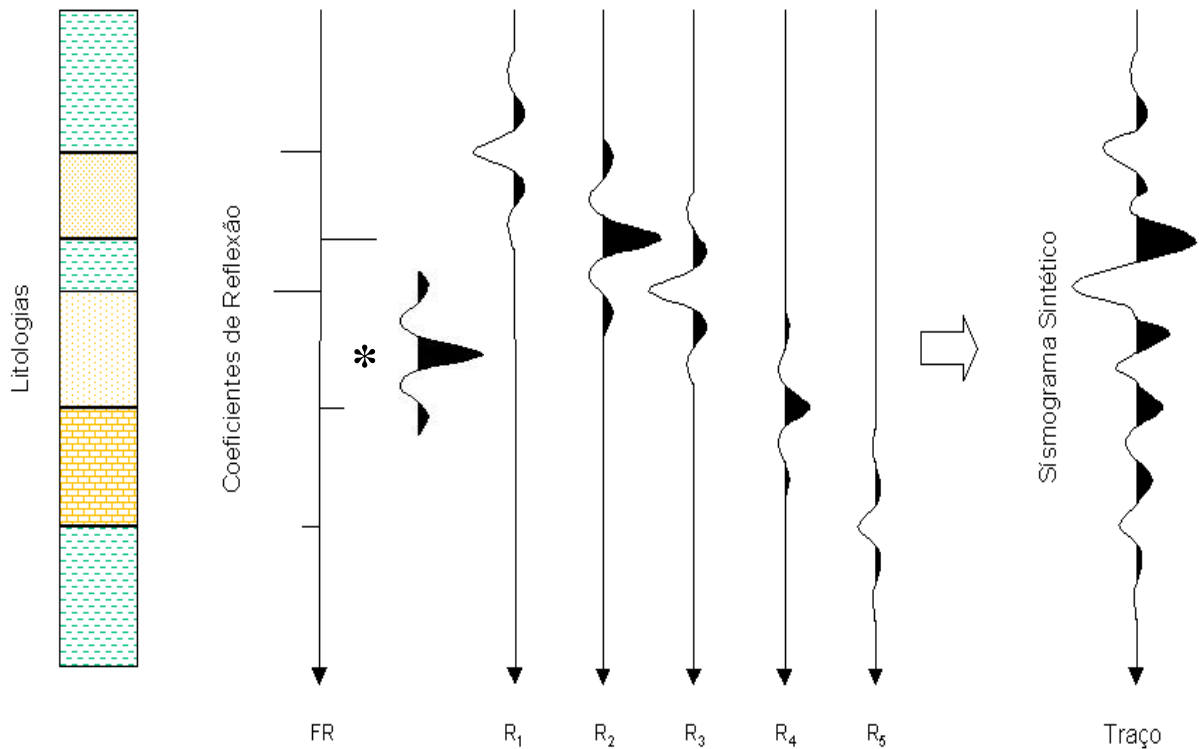


Figura 2.2 - Processo de formação de um traço sísmico através da convolução de um pulso sintético do tipo Ricker (derivada segunda da função gaussiana) com a função refletividade (FR).

Um traço sísmico¹ é obtido da convolução da função refletividade com o pulso emitido pela fonte. O processo está ilustrado na Figura 2.2 utilizando uma coluna estratigráfica simples e um pulso sísmico sintético do tipo Ricker. Em cada interface entre duas litologias a forma do pulso é multiplicada pelo coeficiente de reflexão e mapeada nesta posição; o conjunto de todos os resultados é então somado para formar o traço. Note-se que algumas amplitudes resultantes não guardam correspondência direta com os coeficientes que as geraram e outras aparecem onde nem mesmo existem interfaces. Este efeito é resultante do uso de um pulso com um conteúdo limitado de frequências.

O uso de um pulso sísmico com um conteúdo limitado de frequências implica em um limite de resolução do método. Em sísmica, resolução pode ser definida como a capacidade de separar dois eventos muito próximos com base em algum critério. Em termos de resolução vertical, dois critérios bastante usados são $\lambda/4$ ou $\lambda/8$, onde λ é o comprimento de onda dominante do pulso. Dessa forma, a menor espessura possível de resolver com o método sísmico depende da velocidade média e do conteúdo de frequências do sinal. No limite, onde todas as frequências estão presentes, a resolução é total, já que o pulso é a própria função delta de Dirac. Na prática, as frequências associadas às reflexões variam na faixa de 30 a 60 Hz. Considerando uma velocidade média de 2000 m/s, a menor espessura distinguível pela sísmica é da ordem de 4m segundo o critério de $\lambda/8$.

O modelo da Figura 2.2 está referenciado em profundidade. Entretanto, o método sísmico mede o tempo de propagação que o pulso leva para refletir nas interfaces até ser registrado nos receptores (tempo duplo de propagação – ida e volta do pulso). Portanto, o processo de convolução é realizado à medida que o pulso encontra as interfaces ao avançar em tempo, sendo o tempo de ocorrência de cada coeficiente de reflexão determinado pela velocidade de propagação das ondas elásticas dentro de cada litologia (velocidade intervalar).

Existem diversos caminhos possíveis da fonte até o receptor com o mesmo tempo de percurso. Um de particular interesse são as múltiplas, que resultam do fenômeno de reverberação de energia entre uma ou mais camadas. A aparência de uma múltipla nos registros é semelhante a

¹ Traço sísmico é o termo usado para designar uma coluna de amostras em um registro, seção ou volume sísmico, i.e., um sinal unidimensional vertical.

uma reflexão primária. Entretanto, a múltipla leva mais tempo do que uma reflexão primária da mesma interface para atingir a superfície, dando a falsa impressão de ser uma reflexão de uma interface mais profunda.

Um problema sério relacionado à qualidade dos dados sísmicos é a alta quantidade de ruídos, definidos como quaisquer energias registradas que não sejam o sinal de interesse. Existem diversas fontes de ruídos. A mais evidente são as condições não controladas de aquisição de campo, que geram o ruído ambiental ou aleatório. Os ruídos gerados pelas fontes sísmicas estão associados a diversas ondas que se propagam próximas à superfície, sendo alinhados nos registros e por isso denominados ruídos coerentes. O nível de ruídos é particularmente alto na maioria dos dados terrestres, cuja qualidade é em geral baixa devido à grande distorção sofrida pelo pulso sísmico nas camadas intemperizadas próximas da superfície. Essas camadas representam uma zona de baixa velocidade de propagação que se estende desde a superfície até dezenas ou centenas de metros de profundidade, em geral coincidindo com o lençol freático. As velocidades de propagação dentro desta zona variam entre 300 e 1500 m/s. Os retardos provocados por estas baixas velocidades, associados às variações de topografia da superfície e da base da camada de intemperismo, acabam por degradar a continuidade espacial dos refletores.

O meio de propagação, a Terra, é uma grande fonte de distorção, apresentando o comportamento típico de um filtro corta-altas. A absorção seletiva de frequências resulta em um alongamento do pulso sísmico, com uma conseqüente perda de resolução. O pulso que efetivamente se propaga pelo subsolo também está sujeito ao decaimento de amplitude devido ao espalhamento geométrico (diminuição da densidade de energia). Estes problemas são particularmente críticos para reflexões com longos tempos de percurso. Dessa forma, a amplitude dos sinais tende a decrescer com o tempo, enquanto que o ruído aleatório persiste e eventualmente domina.

2.1 Aquisição de dados

Existem diversas técnicas de aquisição sísmica. Este trabalho se limita aos procedimentos envolvidos no método de aquisição *CMP* (*Common Mid-Point*). Uma ilustração do esquema

de aquisição bidimensional em terra e no mar é apresentada na Figura 2.3. No caso da aquisição tridimensional são empregadas mais linhas de receptores em paralelo.

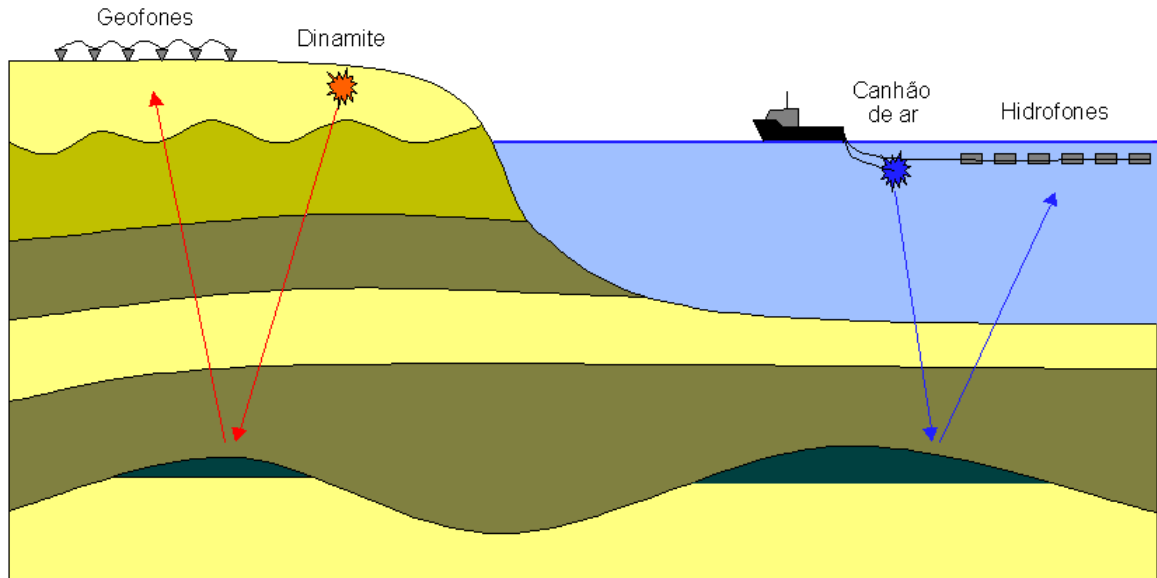


Figura 2.3 - Princípio da aquisição terrestre e marítima de dados sísmicos.

As fontes sísmicas convencionais podem ser explosões de dinamite, canhões pneumáticos de ar, vibradores possantes, etc. Os receptores são geofones, que medem a velocidade da passagem do pulso sísmico pelo terreno, ou hidrofones, que medem a variação de pressão por ele gerada na água. Ambos são transdutores que convertem as variações das ondas sísmicas em valores de tensão. Estes são genericamente denominados amplitudes sísmicas e variam de negativo a positivo, sendo armazenados como números em representação digital de ponto-flutuante. Cada fonte é composta por um grupo de diversos elementos, distribuídos segundo um arranjo com o intuito de melhorar o acoplamento com o solo (no caso da aquisição terrestre) ou modelar um pulso desejado através de interferência (na aquisição marítima). Da mesma forma, cada estação de receptores é formada por um arranjo de diversos elementos, com o objetivo de discriminar os comprimentos de onda dos ruídos coerentes e atenuar o ruído ambiental em relação ao sinal. A cada fonte corresponde um grande número de receptores, podendo chegar facilmente a mil em levantamentos tridimensionais. Os receptores

são conectados ao equipamento de controle e registro denominado sismógrafo, que executa a conversão analógico-digital dos valores de amplitude e armazena os dados em meio magnético. Em geral os dados são registrados entre quatro e oito segundos, com um intervalo de amostragem de dois milisegundos, o que pode gerar uma massa de dados de até 16 Mbytes por registro.

Após adquirir os dados em uma determinada posição de tiro, o dispositivo de registro (fontes e receptores) é movido para a posição seguinte e o processo é repetido até que a cobertura total da área seja atingida. Esta movimentação é feita segundo critérios (*e.g.*, intervalo de tiros, receptores, número de canais [receptores] ativos por tiro, etc.) que determinam o custo do levantamento.

Um registro sísmico é o conjunto de todos os traços comuns a uma mesma fonte sísmica. Um registro bidimensional terrestre é apresentado na Figura 2.4. Cada traço está associado a uma estação ou grupo de geofones. A posição da fonte está ladeada pelos menores tempos de registro de energias por ela geradas. A representação gráfica utilizada é uma das mais comuns em sísmica: cada traço está apresentado como sendo uma série temporal de amplitudes conectadas por uma função de reconstrução (linear ou *spline* cúbica) que tem a sua área positiva preenchida. Esse gráfico é conhecido como *wiggle* (o traço ou linha da função) mais área variável (o preenchimento das áreas positivas).

No registro da Figura 2.4 é possível identificar diversos eventos, dentre eles:

- a) as primeiras quebras, que são as primeiras amplitudes registradas atribuídas à energia gerada pela fonte, são associadas a refrações na base da camada de intemperismo;
- b) ruído ambiente, evidente na forma de amplitudes presentes antes das primeiras quebras;
- c) os ruídos coerentes, eventos de alta amplitude em forma de cone a partir da posição da fonte, que representam ondas que se propagam próximas à superfície;
- d) as reflexões, que representam o sinal de interesse.

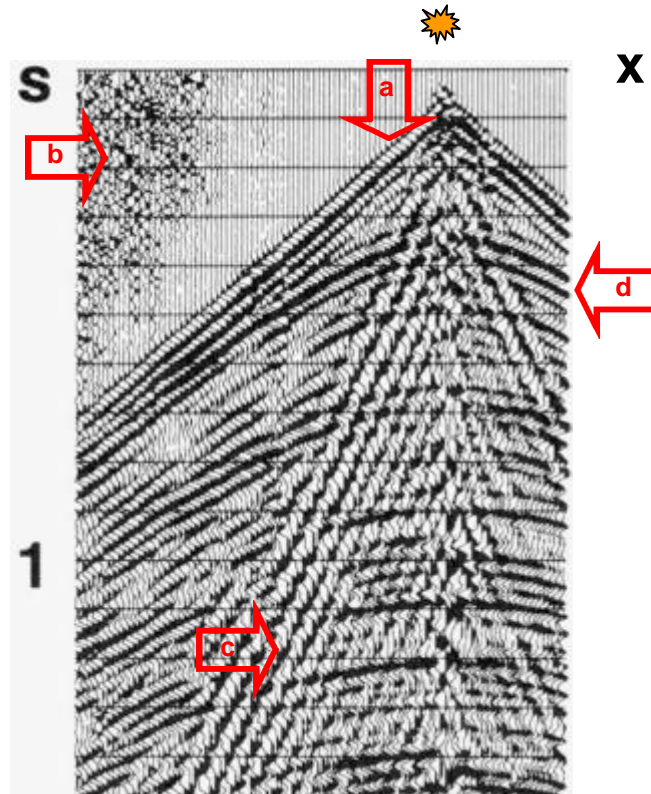


Figura 2.4 - Registro sísmico 2D terrestre (Yilmaz, 1987) em representação do tipo *wiggle* + área variável. O eixo vertical está definido em unidades de tempo (s) e o horizontal representa o afastamento entre traços dado por unidades de comprimento (m). Os seguintes eventos estão identificados: (a) primeiras quebras, (b) ruído ambiental, (c) ruídos coerentes gerados pela fonte e (d) reflexões. A posição da fonte está indicada pela explosão. Cada traço é registrado por um grupo de geofones em superfície.

Em registros de campo as reflexões apresentam uma forma hiperbólica típica, resultante do atraso relativo de registro entre diferentes receptores e diretamente relacionada com a velocidade de propagação das ondas sísmicas. Esse sobretempo é denominado NMO (*Normal Move-Out*) e expressa a diferença de tempo de registro entre um receptor afastado e outro que estivesse na mesma posição da fonte. Para uma interface plana horizontal com um meio subjacente homogêneo, os tempos de registro obedecem a uma hipérbole perfeita dada por:

$$t_x^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}, \quad (2.2)$$

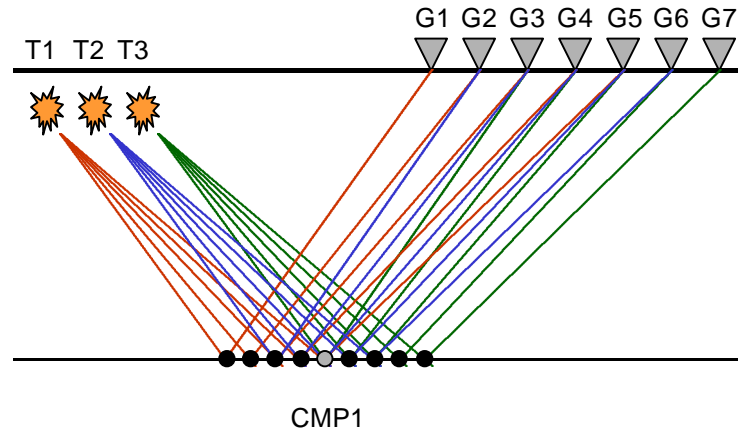
onde x é a distância fonte-receptor, t_x o tempo correspondente, t_o o tempo projetado no afastamento zero (diretamente abaixo da fonte) e v a velocidade do meio. Para as interfaces subjacentes, os tempos de registro não mais obedecem à expressão (2.2), seguindo relações complexas de geometria hiperbolóide, apesar de serem por ela aproximados na prática.

Segundo a lei de Snell¹, uma reflexão de interfaces planas horizontais ocorre no ponto que se encontra a meio caminho entre a fonte e o receptor envolvidos na sua geração e registro. Essa relação pode ser vista na Figura 2.5(a) para cada um dos raios que emanam de uma fonte.

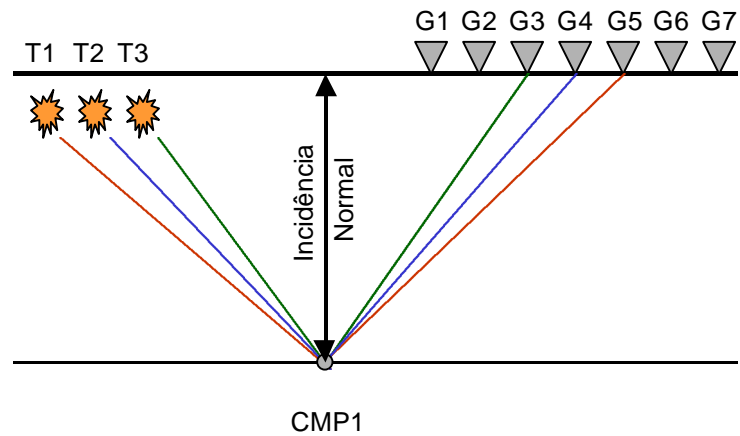
A técnica CMP é um método de aquisição/processamento no qual cada fonte está associada a um dado número de estações de receptores e, da mesma forma, cada estação de receptores está associada a diversas fontes. O princípio dessa técnica é ilustrado na Figura 2.5(b), onde diversos pares fonte-receptor de diferentes registros da Figura 2.5(a) estão posicionados de maneira que iluminam o mesmo ponto na subsuperfície (CMP) localizado a meio caminho entre os pares. Durante o processamento, os diversos traços associados a um CMP são ajustados (como será visto adiante) para que representem uma situação hipotética de registro onde fonte e receptor são coincidentes (afastamento zero). A técnica CMP explora a redundância de registros para aumentar a razão sinal-ruído e obter informações sobre a velocidade de propagação das ondas nas diversas litologias presentes na subsuperfície.

O número de vezes que um CMP é amostrado por diferentes trajetórias de diferentes registros é chamado cobertura ou multiplicidade, que é também um dos fatores determinantes do custo do levantamento.

¹ $\sin \hat{i} / v_1 = \sin \hat{q} / v_2$, onde \hat{i} é o ângulo de incidência a partir do meio v_1 e \hat{q} o ângulo da onda transmitida para o meio com velocidade v_2 . Se o meio é o mesmo, $\hat{i} = \hat{q}$, relação também conhecida como a lei da reflexão.



(a)



(b)

Figura 2.5 - Geometria de aquisição CMP: (a) seqüência de aquisição regular em campo; (b) trajetórias pertencentes a um mesmo CMP. As posições indicadas por "T" representam as estações de tiro e "G" as estações de geofone.

2.2 Processamento sísmico

O processamento sísmico compreende um conjunto de técnicas que atuam sobre os dados de modo a retirar efeitos indesejáveis e aumentar a relação sinal-ruído, visando facilitar a interpretação. Nesta Seção, apenas as três técnicas principais são discutidas de maneira sucinta. Na ordem comum de aplicação, são elas: (i) **deconvolução**, (ii) **empilhamento** e (iii) **migração**. Maiores detalhes podem ser encontrados em Yilmaz (1987).

2.2.1 Deconvolução

O sinal ideal emitido pela fonte sísmica seria um delta de Dirac, i.e., um pulso com duração infinitesimal e amplitude infinita, que ao ser convolvido com a função refletividade resultaria nela própria. Entretanto, isso não é realizável fisicamente. Desta forma, o pulso resultante apenas aproxima de forma muito grosseira a função delta de Dirac. O resultado desta aproximação pode ser visto na Figura 2.2, em que foram geradas amplitudes que não estão diretamente relacionadas com interfaces nos seus tempos de registro correspondentes.

Matematicamente, um traço sísmico pode ser entendido como a convolução em cascata da função refletividade com a resposta impulsiva de diversos efeitos e mais uma parcela aditiva de ruído. Essa abstração é denominada modelo convolucional, sendo definida de uma forma simplificada como:

$$x(t) = [r(t) * p(t) * w(t) + N(t)] * I(t),$$

onde $x(t)$ é o traço sísmico, $r(t)$ a função refletividade, $p(t)$ o conjunto de efeitos de propagação (*e.g.*, espalhamento geométrico, perdas por absorção, perdas por transmissão, reverberações, etc.), $w(t)$ o pulso sísmico, $N(t)$ os ruídos (ambiental e os gerados pela fonte) e $I(t)$ as distorções introduzidas pelo instrumento de registro.

A deconvolução é um processo que atua ao longo do eixo do tempo e visa remover o pulso sísmico básico, distorcido pelos efeitos de propagação e pelo instrumento de registro, dos dados sísmicos registrados e assim obter uma melhor aproximação da função refletividade. Esta meta é atingida pela compressão do pulso, modificando a sua forma para um delta de Dirac (*spiking deconvolution*) através de técnicas baseadas em filtros de Wiener. A Figura

2.6(b) mostra o registro da Figura 2.6(a) após a deconvolução, onde a redução do caráter ondulatório das reflexões mais proeminentes (*e.g.*, a reflexão registrada próxima a 2s) é evidente. A deconvolução alarga o espectro dos dados, que passam a apresentar um conteúdo maior de frequências após a sua aplicação, resultando em um aumento de resolução temporal. Geralmente é necessária uma filtragem após o processo, já que tanto o sinal quanto os ruídos de alta frequência são amplificados. Outra forma de deconvolução visa a remoção das múltiplas presentes nos dados utilizando filtros preditivos (*predictive deconvolution*).

2.2.2 Análise de velocidades e empilhamento

A aquisição de dados sísmicos é feita em coordenadas fonte-receptor (Figura 2.5(a)). Por outro lado, a geometria de processamento é convencionalmente feita em coordenadas ponto médio-afastamento (Figura 2.5(b)). A transformação geométrica necessária para executar esta conversão de domínio é fornecida pelo processo de coleção de traços CMP (*sorting*), que consiste em reagrupar os traços em função de um ponto (ou de uma área arbitrária) comum que eles iluminam em subsuperfície. A Figura 2.6(c) mostra um conjunto de traços que pertencem a um mesmo CMP (*CMP gather*), colecionados a partir de diversos outros registros (não apresentados). A aparência geral de um *CMP gather* é bastante semelhante a um registro original no domínio fonte-receptor. Note-se, entretanto, que os ruídos coerentes paralelos à primeira quebra não mais se encontram em fase, bem como as hipérbolas de reflexões inclinadas (*e.g.*, a que ocorre próxima a 2s na Figura 2.6(b)) são centradas no afastamento zero do *CMP gather*.

O empilhamento (*stacking*) é um processo que responde por uma enorme compressão do volume total de dados adquiridos. Uma grande quantidade de traços sísmicos em um mesmo CMP é corrigida de NMO e empilhada (os traços são somados), resultando em um único traço que simula uma situação em que fonte e receptor são coincidentes (Figura 2.5(b)), embora com uma melhor discriminação de ruído. O objetivo é atenuar efeitos aleatórios e eventos cuja dependência do afastamento seja diferente das reflexões primárias. A correção de NMO é dada por:

$$\Delta T_{NMO} = T_x - T_0 = \sqrt{\frac{x^2}{v} + T_0^2} - T_0$$

e envolve a subtração de um tempo ΔT_{NMO} para cada tempo de registro T_x , com interpolação se necessário. Por ser dependente do tempo, a correção de NMO é classificada como dinâmica.

O empilhamento proporciona uma considerável redução do ruído aleatório na medida em que soma de forma coerente os sinais e de forma aleatória os ruídos, resultando em uma atenuação estatística destes que é proporcional à raiz quadrada do número de traços empilhados. Este fator de melhoramento é baseado na hipótese de que o sinal é idêntico em todos os traços de um grupo CMP, enquanto que o ruído aleatório de um traço é não-correlacionável em relação aos demais. O empilhamento também atenua ruídos coerentes devido às suas diferentes velocidades de empilhamento comparadas com as reflexões.

As reflexões inclinadas não resultam em um ponto comum de reflexão, e sim em uma área espalhada alinhada com o mergulho da interface. Nesses casos é normalmente aplicada uma correção denominada DMO (*Dip Move-Out*) antes do empilhamento. O DMO é o processo que corrige o efeito de espalhamento dos pontos de reflexão ao longo das superfícies inclinadas, transformando um CMP em um CRP (*Common Reflection Point*). Após a sua aplicação, eventos com diversas inclinações são empilhados com a mesma velocidade (Sheriff, 1991).

A correção dos efeitos da camada de intemperismo é feita logo antes do empilhamento a fim de garantir uma maior continuidade dos refletores ao longo dos afastamentos. Essa correção é dita estática por ser constante para todo o traço, convertendo as amplitudes para um modelo em que fontes e receptores são deslocados verticalmente para um plano de referência onde não existe material intemperizado.

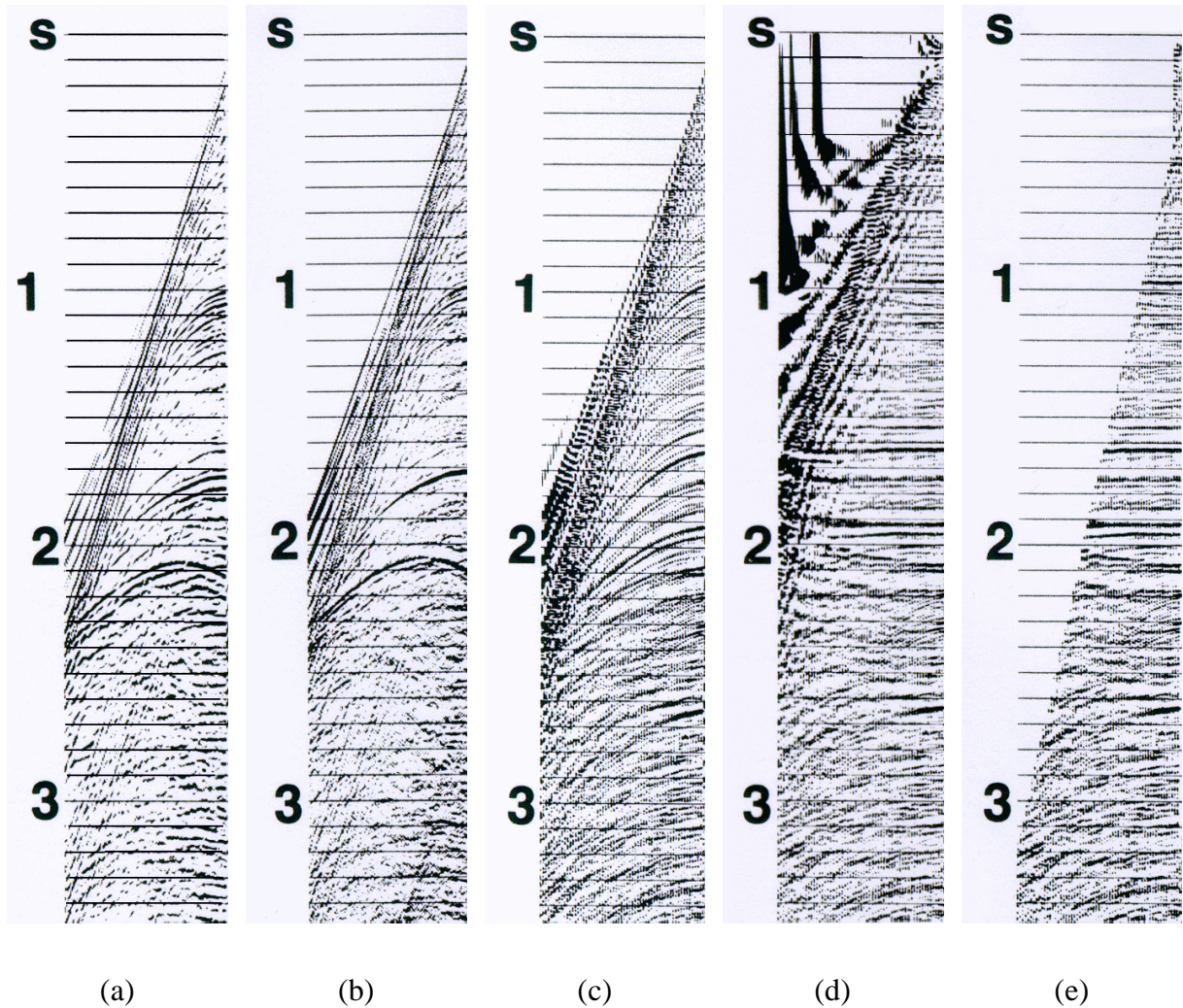


Figura 2.6 - Etapas do processamento sísmico que precedem o empilhamento: (a) registro de campo, (b) deconvolução, (c) CMP, (d) correção de NMO e (e) silenciamento (Yilmaz, 1987).

A amostragem múltipla de um mesmo ponto em subsuperfície, propiciada pela técnica CMP, também fornece informações sobre o campo de velocidades. A análise de velocidades é parte integrante do processo de empilhamento. A técnica consiste em retirar o NMO a partir de uma estimativa de velocidade que melhor horizontalize as hipérbolas de reflexão (velocidade de empilhamento), assumindo uma velocidade constante e interfaces planas horizontais. A saída de um dos tipos de análise (*semblance*) é um gráfico de velocidade *versus* tempo duplo

(Figura 2.7). Nele os valores $f(v,t)$ representam uma medida da coerência do sinal ao longo das trajetórias hiperbólicas governadas por velocidade, afastamento e tempo (equação 1.2). Um alto valor de coerência significa que as amplitudes foram somadas em fase ao longo dos afastamentos, o que indica uma boa estimativa de velocidade. Pares tempo-velocidade são selecionados pelo intérprete com base nos picos de coerência. Esses pontos são então interpolados para formar a função velocidade vertical contínua. A análise de velocidades é feita em CMPs selecionados e interpolada entre estes para todo o volume sísmico a fim de fornecer o campo de velocidades tridimensional.

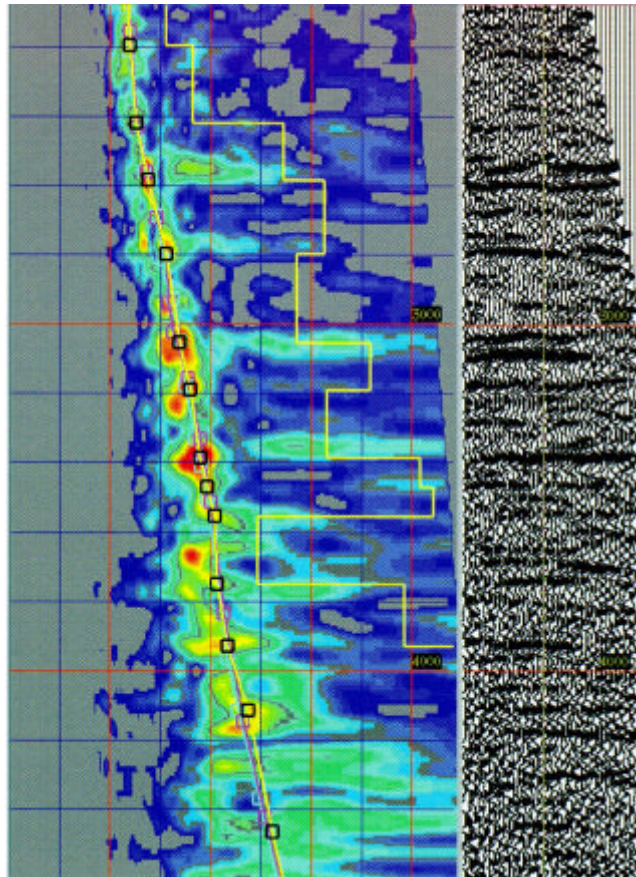


Figura 2.7 - Análise de velocidades (Caldwell *et al.*, 1997). As áreas em vermelho representam coerência alta ao longo das reflexões no CMP da direita. As marcas quadradas em amarelo são os pares (v,t) selecionados pelo intérprete e interpolados linearmente.

O campo de velocidades é usado para corrigir as hipérboles de *move-out*. Na Figura 2.6(d) as reflexões aparecem praticamente horizontalizadas. Entretanto, esta correção estira os traços de forma dependente do tempo, o que resulta em um deslocamento do conteúdo de frequências para a região baixa do espectro. Essa distorção é grande em tempos pequenos e afastamentos longos. Para prevenir a degradação de eventos rasos, a zona distorcida é eliminada antes do empilhamento através do processo denominado silenciamento (Figura 2.6(e)). Uma vez horizontalizados e silenciados, os traços são então empilhados, formando um único traço. O resultado do empilhamento de todos os traços da Figura 2.6(e) pode ser visto no traço indicado por um triângulo em superfície na Figura 2.8(a).

2.2.3 Migração

A lei de Snell dita que o ângulo de incidência é igual ao de reflexão e que o ponto de reflexão nas interfaces está a meio caminho entre fonte e receptor se o refletor é horizontal. Quando as ondas são refletidas por interfaces inclinadas ou quando existem variações laterais de velocidade, a reflexão registrada nos receptores não é mais proveniente do ponto médio. Como resultado, a informação sísmica é registrada em posições de superfície diferentes das suas equivalentes em subsuperfície, gerando uma falsa impressão das estruturas. Este efeito é corrigido pelo processo denominado migração. A migração recoloca os refletores na sua posição espacial correta e colapsa difrações¹, podendo assim ser entendida como um processo de deconvolução espacial que visa aumentar a resolução espacial.

A reflexão de uma interface inclinada de um ângulo α em um meio isotrópico de velocidade constante é representada em seção sísmica por uma inclinação aparente β , segundo a relação fundamental da migração:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \beta ,$$

¹ As difrações são originadas por pontos singulares de tamanho compatível com o comprimento de onda do pulso ou pelo cancelamento parcial de reflexões em bordas de estruturas (*e.g.*, falhas) e ocorrem em registro ou seção com forma hiperbólica.

que expressa um aumento de inclinação dos eventos mergulhantes após a aplicação da migração.

A Figura 2.8 mostra uma seção antes e após a aplicação da migração. Note-se que diversas difrações foram colapsadas para um único ponto na seção migrada, bem como as reflexões inclinadas tiveram o seu ângulo de mergulho aumentado.

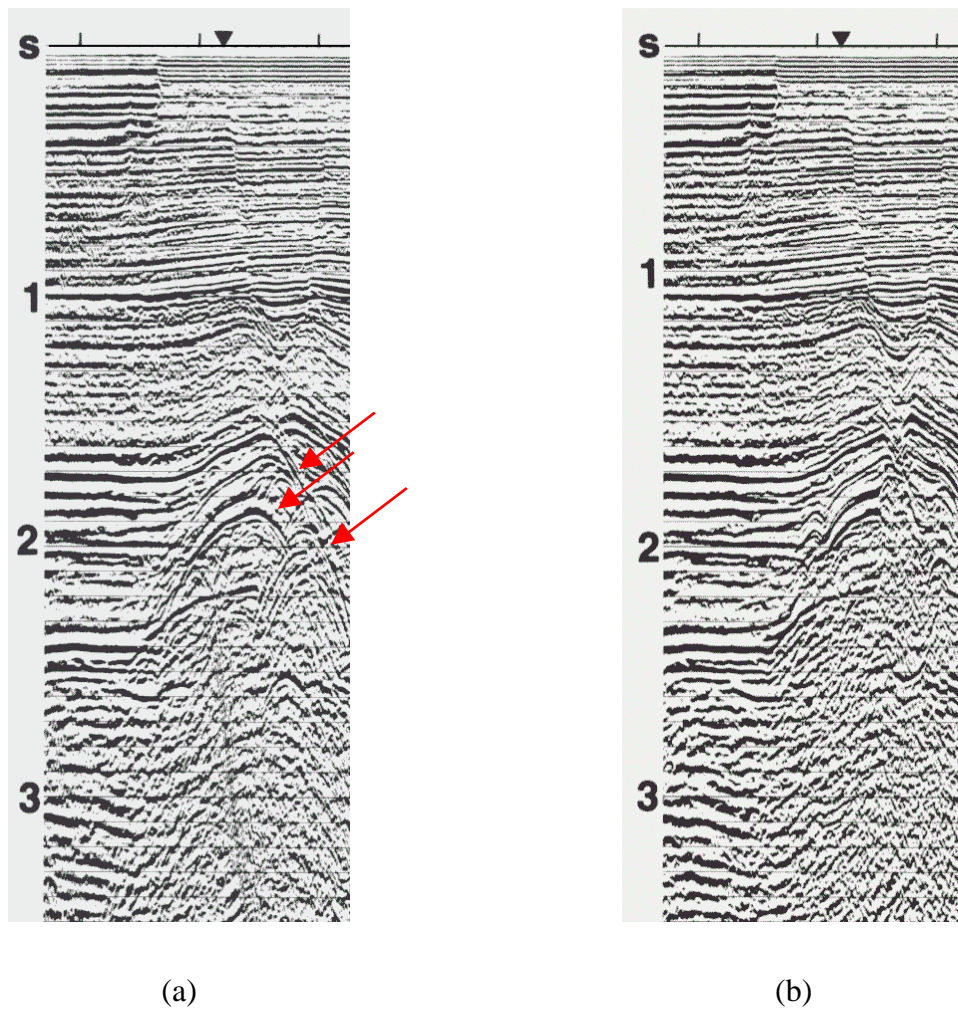


Figura 2.8 - Efeito da migração: (a) seção empilhada e (b) a mesma seção após a aplicação de migração (Yilmaz, 1987). Note-se o colapso das difrações (setas vermelhas em (a)). O ponto indicado por um triângulo na superfície corresponde ao traço empilhado a partir dos dados da Figura 2.6.

A migração pode ser executada antes ou depois do empilhamento, sendo este último o caso mais comum. O processo pode empregar soluções numéricas do tipo diferenças finitas, continuação do campo de ondas, integração ao longo de curvas de difração ou equivalentes no domínio da frequência. Existem migrações especiais que produzem um novo volume ou seção já convertido para profundidade (migração em profundidade).

As correções dinâmicas visam retirar o efeito do afastamento fonte-receptor e estão inter-relacionadas. O NMO corrige o retardo de um traço afastado assumindo uma interface horizontal. Já o DMO move os dados para a posição de afastamento zero (normal à interface). Por fim, a migração aplica um deslocamento adicional das amplitudes para suas verdadeiras posições em subsuperfície. Os efeitos de cada processo e suas inter-relações estão ilustrados na Figura 2.9.

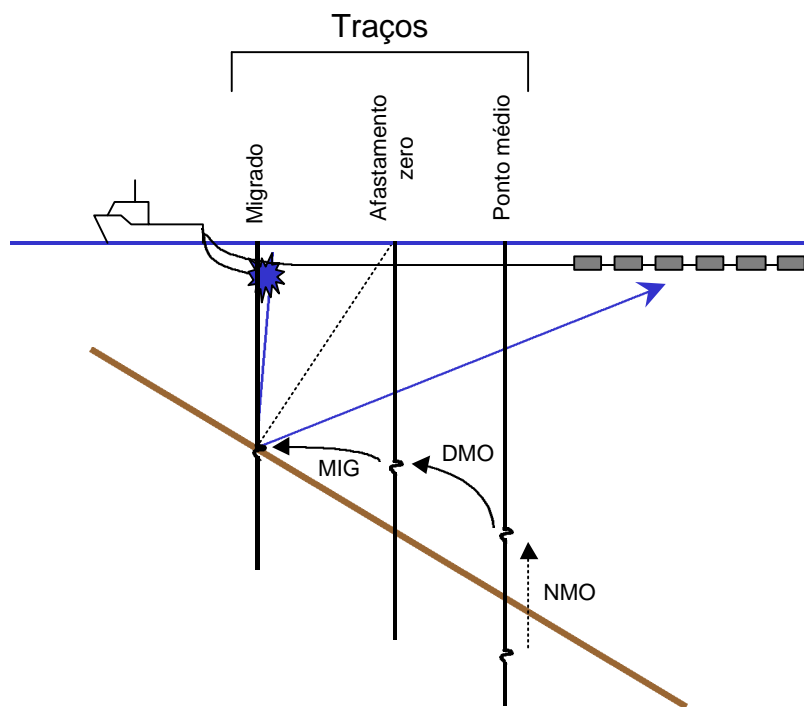


Figura 2.9 - Relação entre NMO, DMO e migração (MIG).

O produto final do processamento sísmico é uma seção ou volume que tenta aproximar uma imagem da subsuperfície, embora em tempo. Os milhares de traços presentes em uma seção

ou volume são ajustados através das técnicas de processamento descritas acima. O volume de dados produzido pelo processamento sísmico 3D representa os valores de amplitude para cada ponto (x,y,z) que está posicionado nos nós de uma malha regular definida por *inlines*, ou linhas paralelas à direção preferencial de aquisição dos dados, e *crosslines*, perpendiculares àquelas e não levantadas diretamente no campo. Planos de z constante são denominados *time-slices*. Os valores x e y representam as coordenadas geográficas, enquanto z pode representar tempo ou profundidade. Os intervalos de amostragem típicos nos eixos x e y são da ordem de uma dúzia de metros, estando diretamente relacionados com os custos de aquisição, enquanto em z é freqüente uma reamostragem para quatro a partir dos dados originais em dois milisegundos. Quando z está referenciado em profundidade, o espaço entre amostras depende da técnica de conversão para profundidade empregada, embora seja tipicamente da ordem de alguns metros. Portanto, existe uma forte tendência a haver muito mais amostras em z do que nos demais eixos. Um arranjo tridimensional S_{ijk} é normalmente usado para armazenar as amostras, com os índices indicando suas posições na malha.

Finalmente, a qualidade das informações fornecidas pela sísmica de reflexão depende da resposta da Terra ao método e da eficácia do processamento de dados. O sucesso de cada uma das etapas do processamento sísmico depende da confirmação das hipóteses por elas assumidas. A deconvolução assume um pulso verticalmente incidente, estacionário e de fase mínima¹, bem como uma distribuição de refletividade uniforme e livre de ruídos. Por sua vez, o empilhamento assume um *move-out* hiperbólico, enquanto que a migração é baseada em um campo de ondas com afastamento zero. A rigor, nenhuma dessas hipóteses é válida. Entretanto, os processos são bastante robustos e pouco sensíveis às violações das hipóteses, produzindo resultados bastante próximos da imagem real da subsuperfície.

2.3 Interpretação

A interpretação consiste em derivar um modelo geológico simples que seja compatível com os dados observados, normalmente envolvendo a integração de diversos métodos de investigação

¹ Pulso que apresenta a maior parcela da energia concentrada no seu início.

diretos e indiretos. A determinação do modelo é um problema de solução indeterminada, uma vez que diversas configurações geológicas podem produzir as mesmas medidas observadas. Portanto, a interpretação é um processo subjetivo baseado em medidas indiretas (métodos geofísicos) e balizado por informações diretas pontuais (adquiridas nos poços).

O objetivo principal da interpretação dos dados sísmicos é determinar a posição e atitude dos refletores a partir das medidas de tempo de percurso e inferir a estrutura geológica e a estratigrafia. O modelo da subsuperfície pode então ser reconstruído com base no tempo de percurso, na velocidade média e na amplitude das ondas refletidas.

Os dados sísmicos podem fornecer evidências significativas da presença de acumulações de hidrocarbonetos. Os indicadores mais comuns são as anomalias de amplitudes e a variação de amplitude em função do afastamento. As anomalias podem ser tanto um aumento (*bright spot*) como uma diminuição (*dim spot*) de amplitude, bem como alterações de fase ou frequência do sinal. Eventos localizados e de grande amplitude podem corresponder a reflexões do contato gás/água, gás/óleo ou óleo/água dentro dos reservatórios. Sua atitude é essencialmente horizontal devido à tendência de alinhamento dos fluidos ao longo de superfícies equipotenciais de gravidade, independentemente da complexidade geométrica do reservatório. A interpretação das anomalias deve ser feita com critério, pois outras causas podem produzir o mesmo efeito (*e.g.*, interferências, focalização geométrica ou de velocidades, erros de processamento, etc.). A variação de amplitude ao longo de uma reflexão sísmica em função da distância fonte-receptor (*AVO – Amplitude Variation with Offset*) depende dos contrastes de velocidade, densidade e coeficiente de Poisson¹ entre dois meios. Uma grande variação nesse coeficiente tende a produzir um aumento de amplitude com o afastamento, como a que ocorre quando os poros de uma rocha reservatório estão preenchidos por gás.

A partir das amplitudes medidas é possível derivar diversos outros atributos (*e.g.*, envelope do traço, frequência e fase instantâneas, velocidade, etc.) que podem ser utilizados isoladamente ou combinados como auxiliares na identificação das feições estruturais e estratigráficas e no entendimento das suas relações.

¹ Razão entre a contração transversal e o alongamento longitudinal de um material submetido à tração.

A modelagem também é um aspecto importante da interpretação. O seu objetivo é auxiliar na identificação de eventos sísmicos utilizando dados simulados numericamente a partir de modelos geológicos em profundidade. Os parâmetros do modelo são ajustados iterativamente até que os tempos e as amplitudes sintéticos sejam iguais, dentro de uma tolerância especificada, aos dados medidos em campo. Alternativamente, podem ser usadas modelagens físicas, nas quais são empregadas fontes, receptores e modelos reais em miniatura.

A conversão tempo-profundidade é um dos mais importantes processos de processamento/interpretação. Consiste em estimar a profundidade dos eventos a partir das informações em tempo fornecidas pela sísmica. Para a energia refletida que se propaga na vertical, a profundidade de uma interface é dada por:

$$z = \frac{V_{med}t}{2},$$

onde V_{med} é a velocidade média e t o tempo duplo. A V_{med} pode ser obtida de poços, calculada a partir da análise de velocidades ou simplesmente inferida. Para situações mais complexas são necessárias correções mais sofisticadas.

Finalmente, nem todas as acumulações de hidrocarbonetos são comercialmente explotáveis. Portanto, a interpretação deve ser criteriosa na definição de espessuras e áreas, conteúdo de fluidos, níveis de saturação, etc. a fim de avaliar corretamente o potencial econômico de uma acumulação.

3 Trabalhos anteriores

Diversas técnicas de visualização volumétrica têm sido desenvolvidas a partir da segunda metade dos anos oitenta. Em sua grande maioria são aplicadas e adaptadas a dados médicos gerados a partir dos métodos de Tomografia Computadorizada de Raios-X (CT), Ressonância Magnética (MRI) e Tomografia de Emissão de Pósitrons (PET). Um número muito menor de trabalhos voltados para dados de ultra-sonografia 3D tem sido publicado. Raros trabalhos se utilizam de dados de sísmica de reflexão como objeto de estudo. A semelhança de princípios físicos entre estes dois últimos métodos e suas complexidades intrínsecas podem explicar tamanha diferença nos seus estados-da-arte quando comparados aos demais.

3.1 Tomografia de raios-X (CT)

Esta técnica mede o grau de transparência dos tecidos aos raios-X, o que é uma função da densidade de elétrons dos elementos. Os dados são adquiridos na forma de um conjunto de seções planas separadas por alguns milímetros. A informação tridimensional é obtida a partir da reconstrução tomográfica do conjunto de perfis com base no teorema de Fourier *slice projection* (ou transformada Radon), o qual permite obter o volume completo a partir de suas projeções utilizando uma técnica de retroprojeção (*backprojection*). A informação associada a cada *voxel* é uma soma ponderada de valores da densidade de todos os materiais presentes no volume (Bentum, 1996).

Os dados de CT são tipicamente da ordem de 256x256x64 *voxels*, cada um representando uma densidade por um número em representação de 12-bit. O contraste entre ossos e tecidos moles é excelente. O mesmo, entretanto, não ocorre entre os tecidos moles do tipo músculo e gordura. Métodos de visualização baseados na extração de superfícies têm sido tradicionalmente empregados com bons resultados. Alternativamente, métodos de visualização volumétrica direta baseados em semitransparências também vêm sendo empregados para melhor definir detalhes pequenos ou delgados, situação na qual os métodos de extração de superfície falham. O seu sucesso se deve ao conhecimento prévio das

densidades médias dos diferentes tecidos do corpo humano, o que permite uma boa associação entre os dados medidos e suas cores e opacidades.

3.2 Ressonância magnética (MRI)

Esta técnica utiliza campos magnéticos intensos (8 ordens de grandeza maiores que o campo magnético terrestre) para excitar prótons dentro do corpo humano através do fenômeno de ressonância magnética nuclear. Como resposta, cada próton emite uma frequência associada a um deslocamento de fase que permite determinar sua localização exata no espaço. A informação tridimensional é geralmente reconstruída a partir de um conjunto de seções bidimensionais, como em CT, embora a espessura de cada perfil possa variar de menos de um milímetro até vários centímetros. A informação associada a cada *voxel* é uma composição da densidade dos prótons, o que depende essencialmente da quantidade de água presente nos diferentes tecidos (Bentum, 1996).

Os dados de MRI são tipicamente da ordem de 256^3 *voxels*, cada um representando uma intensidade pontual por um número em representação de 12-bit. A sua maior vantagem com relação à CT é o excelente contraste entre tecidos moles, apesar dos ossos serem apresentados de forma mais pobre. Uma desvantagem da MRI é o conteúdo significativamente mais alto de ruídos. Os métodos de visualização baseados em extração de superfícies geralmente falham por serem sensíveis a erros de segmentação, o que é comum nesses dados. Portanto, a visualização mais utilizada é a direta baseada em semitransparências.

3.3 Tomografia de emissão de pósitrons (PET)

Esta técnica mede a taxa de decaimento radioativo de uma substância injetada no corpo do paciente, que se acumula em determinados órgãos de forma seletiva segundo suas propriedades farmacológicas. A informação associada a cada *voxel* representa a concentração da substância em cada ponto, o que fornece informações fisiológicas ao invés das anatômicas obtidas com CT e MRI.

Os dados de PET são bastante ruidosos e de baixa resolução, o que indica o uso de visualizações diretas semitransparentes. Para fornecer informações estruturais complementares, geralmente são utilizadas técnicas de visualização combinada integrando estes dados com CT ou MRI (Bentum, 1996).

3.4 Ultra-sonografia 3D

Os dados de ultra-sonografia 3D estão entre os de visualização mais complexa em medicina. A falta de uma técnica apropriada capaz de extrair superfícies bem definidas a partir dos dados adquiridos torna limitado o uso deste método quando comparado com CT e MRI (Carr, 1996).

O método de ultra-sonografia compartilha os mesmos princípios físicos com a sísmica de reflexão. Um pulso sonoro de curta duração e frequência fixa (neste caso entre 1 e 15 MHz, muito superior à sísmica) é emitido através do corpo humano por um conjunto de fontes em contato com a pele. As ondas sonoras se propagam com uma velocidade entre 1450 e 1580 m/s, dependendo do tipo de tecido. A energia é parcialmente refletida ao encontrar uma interface entre dois tecidos diferentes, sendo detectada por sensores posicionados junto à fonte. As altas amplitudes medidas correspondem a regiões com uma alta variação de impedância acústica, definida pelo coeficiente de reflexão em (2.1). Como resultado, o que é visualizado efetivamente é a derivada da distribuição espacial desta grandeza. O modelo do interior do organismo pode então ser reconstruído com base no tempo de percurso, na velocidade média e na amplitude das ondas refletidas.

Algumas características dos dados de ultra-sonografia 3D são apontadas como responsáveis pelo fracasso de métodos de visualização tradicionalmente empregados para CT e MRI (Sakas *et al.*, 1995). Dentre elas, as mais importantes são:

1. quantidade significativa de ruídos e *speckle* (ruído não-aleatório resultante da interferência destrutiva incompleta entre energias oriundas de diferentes pontos difusores vizinhos);

2. faixa dinâmica muito menor do que em CT e MRI (sinal embebido em um *background* muito ruidoso);
3. grande variação espacial de intensidade, mesmo em regiões de tecido homogêneo;
4. superfícies obscurecidas devido à atenuação da energia em tecidos precedentes nos caminhos dos raios;
5. interfaces com nível de amplitude variável causado pela dependência do ângulo de incidência;
6. interfaces não bem localizadas, englobando uma região com diversos *voxels*.

Todos os itens acima são também aplicáveis, por analogia direta, aos dados sísmicos, exceto o ruído *speckle*, que está associado ao maior conteúdo de frequências dos dados de ultrasonografia.

A aparência geral de uma imagem gerada por visualização volumétrica de dados de ultrasonografia é a de um bloco sólido coberto por ruído (*speckle*) com aspecto de neve (Figura 3.1). A reduzida faixa dinâmica torna impossível a discriminação entre ruído e informação através de métodos diretos de segmentação (*e.g.*, *thresholding*). As técnicas de visualização baseadas na extração de iso-superfícies falham devido aos itens 1, 3, 4 e 5 listados acima, uma vez que a amplitude acústica nem sempre é representativa da presença de uma interface entre determinados tipos de tecidos, nem tampouco uma superfície é definida por uma amplitude única. Os métodos de tonalização baseados no gradiente (Capítulo 4) são sensíveis a ruídos e principalmente aos efeitos dos itens 3 e 6, o que pode resultar em artefatos indesejáveis nas superfícies.



Figura 3.1 - Aparência da visualização volumétrica de dados de ultra-sonografia 3D.

Devido à inadequação dos métodos de extração de superfícies aos dados de ultra-sonografia, muitos autores têm utilizado a visualização volumétrica direta (Carr, 1996; Sakas *et al.*, 1995), uma vez que esta evita definir explicitamente os limites entre diferentes tecidos e órgãos. Ainda assim, esta técnica exige um mapeamento entre as amplitudes medidas e a opacidade de cada *voxel* (classificação). Infelizmente não existem métodos gerais e confiáveis para a classificação de tecidos em ultra-sonografia. Alguns resultados satisfatórios têm sido obtidos em aplicações específicas (*e.g.*, para estruturas cardiovasculares e fetos), em que se tira proveito do conhecimento *a priori* do modelo anatômico esperado para melhorar a qualidade das imagens através de filtragens específicas (Sakas *et al.*, 1995).

3.5 Sísmica 3D

Conforme dito anteriormente, a visualização volumétrica aplicada a dados sísmicos tem sido objeto de pouca pesquisa, apesar do potencial que a técnica apresenta para a exploração de hidrocarbonetos.

Em um dos trabalhos pioneiros, Wolfe & Liu (1988) aplicam uma técnica de *thresholding* a dados sísmicos sintéticos obtidos por modelagem física. Neste método, uma cor é usada para representar valores bastante positivos de amplitude e outra para valores fortemente negativos; as amplitudes intermediárias são tratadas como totalmente transparentes. As imagens são construídas através da superposição sucessiva de seções coloridas do volume tridimensional seguindo um arranjo de trás para a frente em relação ao observador. Uma tonalização rudimentar é aplicada, escurecendo de forma constante as seções mais distantes e clareando-as à medida que se aproximam do observador. Uma vez que este método desconsidera a orientação das superfícies contidas no volume de dados, há uma perda de informação de textura e uma supressão de detalhes, como descontinuidades e bordas, que podem ser de grande importância.

Um processamento empírico baseado no envelope do traço é usado para diminuir a oscilação de valores nas interfaces causada pelo uso de um pulso sísmico tipo Ricker. Após serem determinados os máximos e mínimos da função envelope, previamente filtrada por um passa-baixas, os dados são segmentados em intervalos delimitados pelos dois mínimos locais associados a cada valor de máximo. Em cada intervalo são preservadas apenas as amplitudes acima de uma dada fração do máximo local; todas as demais são zeradas. Os autores escolhem, por tentativa e erro, 85% como sendo o valor de corte que efetivamente suprime os lobos laterais do pulso para o conjunto específico de dados que utilizam.

As imagens apresentadas pelos autores mostram uma qualidade típica de dados sintéticos. O processamento de envelope, apesar de aumentar a definição da imagem, resulta em superfícies com um conteúdo reduzido de frequências. A falta de um modelo de iluminação aprimorado se faz sentir pela ausência de detalhes e pelas imperfeições nas interfaces. Não é feita qualquer referência ao mapeamento de amplitudes nas interfaces. A oclusão de partes importantes do volume de dados é identificada pelos autores. Entretanto, em vez de tratar o problema como apropriado ao uso de semitransparências, eles optam por usar uma animação seqüencial de perfis consecutivos para auxiliar o intérprete a criar mentalmente um modelo tridimensional. Por outro lado, o método é extremamente simples e pode ser bastante acelerado nos *hardware* atuais.

Sabella (1988) apresenta um novo método para calcular a equação de *rendering* e o aplica a dados sísmicos. Entretanto, nenhuma consideração é feita sobre a natureza dos dados e/ou

técnicas adicionais de tratamento das informações. As imagens apresentadas mostram uma aparência de radiografia e em geral são perceptualmente pobres.

Em um trabalho de revisão, Dorn *et al.* (1995) consideram a visualização volumétrica direta uma ferramenta adequada para uma investigação preliminar do volume de dados sísmicos e para a elaboração de um entendimento inicial do macromodelo geológico. Interpretações mais detalhadas são deixadas para uma etapa posterior ao *picking* dos horizontes sísmicos. Diversos atributos podem ser combinados sobre superfícies extraídas interativamente do volume utilizando técnicas de mapeamento de textura.

Recentemente, alguns *software* de visualização volumétrica têm se estabelecido na indústria de petróleo. Em sua grande maioria são baseados em visualização direta com o uso do mapeamento de textura presente na biblioteca OpenGL[®] (Jackie *et al.*, 1993).

Nenhum trabalho na literatura aborda a visualização de dados sísmicos considerando a sua natureza, como Sakas & Walter (1995) fazem para dados de ultra-sonografia. Considerações deste tipo podem resultar em boas visualizações a partir dos dados originais.

4 Visualização volumétrica

Os métodos de visualização de dados volumétricos podem ser classificados de diversas maneiras; uma das mais conhecidas é a subdivisão em **métodos baseados em superfícies** (*surface rendering*) e **métodos diretos** (*direct volume rendering*). Nos métodos baseados em superfícies, um detetor de superfícies é aplicado ao volume ajustando um conjunto de primitivas geométricas, geralmente triângulos, que é então enviado para exibição. Nos métodos diretos a visualização se baseia em um modelo da interação da luz com o conjunto de elementos volumétricos (*voxels*) que gera uma imagem sem utilizar qualquer representação intermediária.

Este Capítulo discute as técnicas utilizadas tanto nos métodos baseados em superfície como nos diretos. A intenção aqui é apresentar uma visão panorâmica da visualização volumétrica que sirva de base para a discussão do próximo Capítulo.

4.1 Métodos baseados em superfícies

A técnica de visualização volumétrica baseada em superfícies é uma das mais antigas e está fortemente vinculada aos métodos convencionais de computação gráfica. Sua idéia fundamental é extrair dos dados tridimensionais uma representação intermediária que descreva uma suposta superfície tangível presente dentro do volume. A determinação da presença ou não desta superfície em *voxels* individuais é feita em uma etapa de segmentação, essencialmente uma classificação binária. Os pontos em que a superfície corta os *voxels* são determinados por interpolação. A descrição final da superfície faz uso de primitivas geométricas poligonais que conectam esses pontos. Finalmente, o conjunto de primitivas é passado para a etapa subsequente, de exibição, que pode tirar proveito da aceleração do *hardware* gráfico.

A primitiva geométrica mais adequada para funções de interpolação de ordem zero é um prisma retangular, uma vez que a superfície é aproximada por um conjunto de faces retangulares. Essa técnica foi utilizada em um dos primeiros algoritmos de visualização

volumétrica, o *cuperille* (Herman & Liu, 1979). Apesar de bastante rápido, o método gera superfícies com aparência de “degraus”, que não são satisfatórias para a grande maioria das aplicações modernas. O uso de funções de interpolação de ordem mais alta permite obter superfícies suavizadas que passam entre os *voxels*, definidas por um valor único e denominadas iso-superfícies.

O algoritmo *contour-connecting* (Fuchs *et al.*, 1977) foi um dos primeiros métodos de visualização volumétrica baseado em iso-superfícies. Para cada fatia do volume de dados é encontrada uma curva de contorno referente a um valor específico (isolinha). De posse do conjunto de isolinhas determinadas para todo o volume, encontra-se uma tesselação ótima que conecte cada par adjacente de fatias. O resultado é uma representação geométrica da iso-superfície na forma de tiras de triângulos, que é então passada ao *hardware* gráfico para exibição. A vantagem deste algoritmo reside na sua simplicidade e na possibilidade de paralelização, já que duas fatias adjacentes no volume são conectadas de forma independente dos demais pares.

O algoritmo *marching cubes* (Lorensen & Cline, 1987) aproxima uma iso-superfície por uma malha de triângulos. As superfícies são extraídas de um conjunto de oito *voxels* vizinhos que representam um cubo. O algoritmo sintetiza em duzentos e cinquenta e seis casos a maneira em que uma iso-superfície pode passar através de um *voxel*, que por simetria se reduzem a apenas quinze. Cada caso corresponde a um conjunto de triângulos armazenados em uma tabela que indica quais das doze arestas do *voxel* são atravessadas. Uma malha de até quatro triângulos é posicionada dentro do cubo (assumindo que cada aresta pode ser intersectada apenas uma única vez), dependendo dos *voxels* estarem dentro ou fora do volume segmentado. Em geral é usada uma interpolação linear para determinar a posição da iso-superfície com mais precisão. Os vetores normais à superfície nos vértices dos triângulos são obtidos por interpolação a partir dos gradientes nos vértices dos cubos. A descrição da superfície e os vetores normais interpolados são então enviados ao *hardware* gráfico, resultando em uma imagem tonalizada.

Uma desvantagem do algoritmo *marching cubes* é a conexão por vezes errada dos conjuntos de pontos, resultando em triângulos espúrios ou buracos na superfície. Este fato levou ao desenvolvimento do algoritmo *marching tetraedra* (Shirley & Tuchman, 1990), que divide cada célula em cinco tetraedros. Somente dois triângulos são necessários para representar a

iso-superfície dentro de cada célula, já que cada tetraedro tem apenas seis arestas. Em contrapartida, mais triângulos são gerados, requerendo mais memória e um maior esforço computacional.

O algoritmo *marching cubes* pode gerar milhões de triângulos quando aplicado a um grande volume de dados, muitos dos quais podem acabar sendo projetados em um mesmo *pixel* na imagem final. Este fato levou ao desenvolvimento do algoritmo *dividing cubes* (Cline *et al.*, 1988), o qual utiliza pontos no espaço como primitivas geométricas. O algoritmo subdivide cada célula atravessada pelas iso-superfícies em várias subcélulas, de tal forma que cada uma se projeta em um único *pixel* no plano da imagem final. Os pontos da superfície são compostos na imagem através de um algoritmo do tipo *z-buffer*. Nenhuma representação intermediária é necessária, o que significa um considerável ganho de desempenho.

Grande parte da informação volumétrica que está presente no interior das superfícies contidas em dados tridimensionais é perdida quando se usa uma representação baseada em primitivas geométricas. A superfície com detalhes de dimensões próximas ao tamanho de um *voxel* não é interpolada corretamente, portanto estes tendem a não ser representados na imagem final. Além disso, a presença de ruídos aleatórios perturba bastante a continuidade da superfície intermediária, a ponto de torná-la pouco eficaz para a visualização das estruturas interiores que ela representa. Finalmente, embora não existam razões que impeçam o uso de transparência em algoritmos baseados em superfície, sua utilização tem sido pouco eficaz. Todos estes motivos sugerem uma abordagem que represente as informações fornecidas pelo volume de dados de forma mais integrada. Tal abordagem é fornecida pelos métodos diretos, discutidos a seguir.

4.2 Métodos diretos

Os métodos de visualização volumétrica direta constroem imagens diretamente a partir do volume original de dados, sem efetuar a classificação binária implícita nos métodos baseados em superfície e sem utilizar qualquer representação intermediária. O *pipeline* de visualização volumétrica direta está fundamentado em um modelo físico de propagação luminosa através de um meio formado por um material semitransparente colorido. A luz emitida por uma fonte

é modelada como sendo parcialmente atenuada e refletida no seu caminho através do volume até o observador. As imagens geradas dependem da atribuição de propriedades como opacidade, cor e luminescência aos dados.

O processo de geração de imagens a partir de dados tridimensionais utilizando técnicas de visualização volumétrica direta pode ser sintetizado em quatro etapas, conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.1.

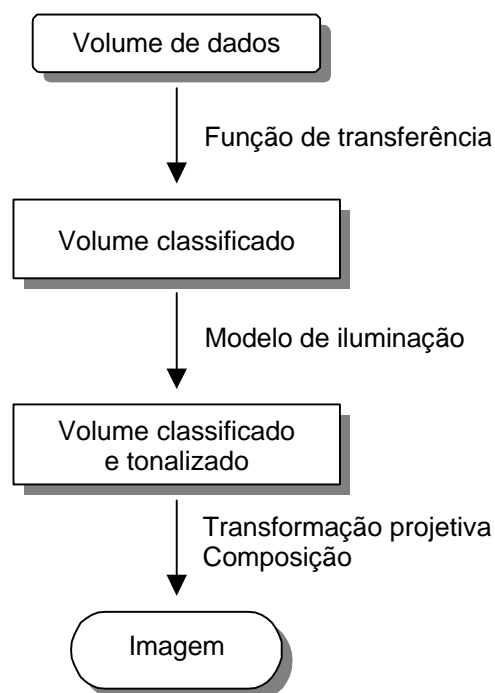


Figura 4.1 - *Pipeline* de visualização volumétrica direta (adaptado de Lacroute, 1995).

A primeira etapa no *pipeline* de visualização volumétrica direta é a classificação dos dados. No contexto deste trabalho, classificação é o processo de determinar os valores discretos para as propriedades primárias que representam um *voxel*, tipicamente cor e opacidade. A opacidade é o inverso da transparência e indica o quanto um determinado *voxel* deixa passar luz. Uma opacidade de 0.0 indica um *voxel* totalmente transparente, que deixa passar toda a luz incidente por detrás de si em relação ao observador, enquanto que uma opacidade de 1.0 indica um *voxel* totalmente opaco, que bloqueia totalmente a luz; valores intermediários

indicam *voxels* translúcidos. A cor de um *voxel* totalmente opaco depende apenas da atribuição de cor que o intérprete faz ao seu valor de amplitude. Valores intermediários são usados para gerar transições suaves, que não levem à oclusão total dos *voxels* encobertos. As opacidades são tipicamente calculadas utilizando os valores dos *voxels* ou uma combinação entre eles e o gradiente de forma a acentuar superfícies ou limites entre diferentes materiais (Levoy, 1988). O objetivo fundamental da classificação é atribuir opacidades baixas a regiões pouco interessantes do volume e altas a regiões que devem ser bem definidas na imagem final. Em geral esta etapa usa uma função de transferência que atribui a cada *voxel* um valor de opacidade, o que é feito interativamente pelo intérprete com base no histograma de distribuição dos dados originais. A Figura 4.2 mostra exemplos de funções simples de classificação. De forma semelhante, uma tabela de cores é aplicada aos *voxels*. Estes processos podem requerer considerável experimentação com diferentes funções até que seja atingido o resultado desejado. O resultado final é um novo volume classificado.

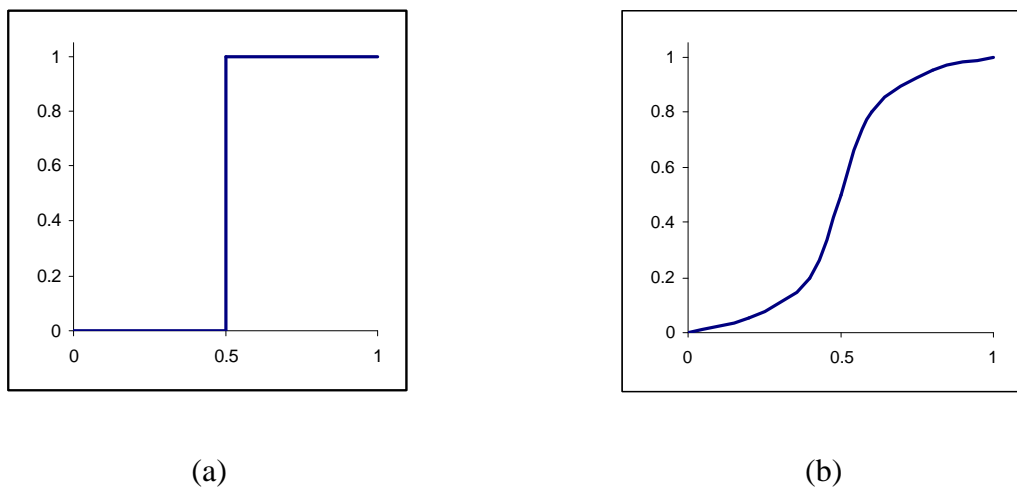


Figura 4.2 - Exemplos de classificadores de opacidade (funções de transferência): (a) binário (*threshold*) e (b) gradual.

A segunda etapa consiste na iluminação de cada *voxel*, operação denominada tonalização (*shading* ou *lighting*). Este passo envolve a determinação de como a luz interage com supostas superfícies presentes no volume de dados, o que é feito com base em um modelo de

iluminação. A tonalização modifica as cores selecionadas pelo intérprete para cada *voxel* ou faixa de valores dos dados originais de forma a acentuar a percepção tridimensional da imagem final. O processo também requer alguma experimentação com parâmetros da(s) fonte(s) luminosa(s), como posição e cor, e propriedades reflexivas dos elementos do volume a fim de obter o realce desejado das feições de interesse. Esta etapa gera um novo volume classificado e tonalizado. Na prática, a maioria das implementações utiliza *lookup tables* para atribuir cor e opacidade aos dados originais, desta forma evitando gerar novos volumes.

A terceira etapa especifica uma transformação projetiva que determina como o volume é observado no plano da imagem final. Este passo envolve a escolha do ponto de visada e do tipo de projeção (paralela ou perspectiva). A composição é a interpolação linear entre a cor de fundo e a cor semitransparente dos *voxels* na imagem (Porter & Duff, 1984), que pode ser vista como a superposição de diversas camadas semitransparentes. Seja I_{in} a cor de fundo, S_i a cor do primeiro plano (relacionada aos *voxels*) e \mathbf{a}_i a opacidade associada, a composição de trás para a frente em relação ao observador pode ser definida como sendo a cor da frente ponderada pela sua opacidade mais a cor do fundo ponderada pela transparência da frente. Matematicamente isso pode ser definido como (Levoy, 1988):

$$I_{final} = S_i \mathbf{a}_i + (1 - \mathbf{a}_i) I_{in}$$

Uma derivação desta equação é apresentada na Seção 4.2.2.

Esta Seção discute inicialmente três aspectos importantes comuns a todos os métodos diretos: a reconstrução do campo escalar a partir dos valores da malha, a equação geral de visualização volumétrica direta e as técnicas de estimativa do vetor normal de superfícies embutidas no volume. Após estes aspectos gerais, os algoritmos mais importantes são classificados e discutidos.

4.2.1 Reconstrução volumétrica

Um algoritmo ideal de visualização volumétrica direta deve executar as seguintes etapas: (i) reconstruir uma função volumétrica contínua a partir das amostras discretas; (ii) transformar a

função segundo uma projeção escolhida; e (iii) estimar a integral de visualização direta (discutida a seguir) ao longo de cada linha de visada (Laur & Hanrahan, 1991). Uma reconstrução imperfeita pode gerar artefatos na imagem final e tornar as operações subseqüentes sujeitas a erros. A reconstrução também é necessária quando o volume de dados tridimensional é sujeito a transformações afins (*e.g.*, translação, dilatação, rotação) ou não-afins (*e.g.*, deformações). A intensidade, a opacidade e a cor de um *voxel* devem ser determinadas em posições intermediárias (pontos amostrais) ao longo do volume (Figura 4.3). A reconstrução é feita na forma de interpolação ao longo dos raios de visada nos algoritmos do tipo *ray-casting* ou utilizando filtros sobre o próprio volume de dados no caso dos algoritmos tipo *splatting* (discutidos na Seção 4.2.4).

Como visto no Capítulo 2, os dados sísmicos tridimensionais são organizados segundo uma matriz de dados S que define o valor de amplitude apenas nos nós da malha tridimensional retilínea e regular definida pela interseção de *inlines*, *crosslines* e *time-slices*. Seja $f(x,y,z)$ uma função do \mathbf{R}^3 que descreve os valores de amplitude de forma contínua em qualquer ponto do volume, ela assume valores $f(x,y,z) = S(x,y,z)$ se (x,y,z) for um nó da malha; caso contrário, $f(x,y,z)$ aproxima os valores de amplitude aplicando alguma forma de reconstrução sobre S . A forma mais elementar é a interpolação de ordem zero, uma função que determina o valor de $f(x,y,z)$ em algum ponto no \mathbf{R}^3 simplesmente tomando o valor $S(x,y,z)$ mais próximo. Este método produz regiões prismáticas uniformes de valores constantes, os próprios *voxels*, e resulta em forte *aliasing* na imagem final.

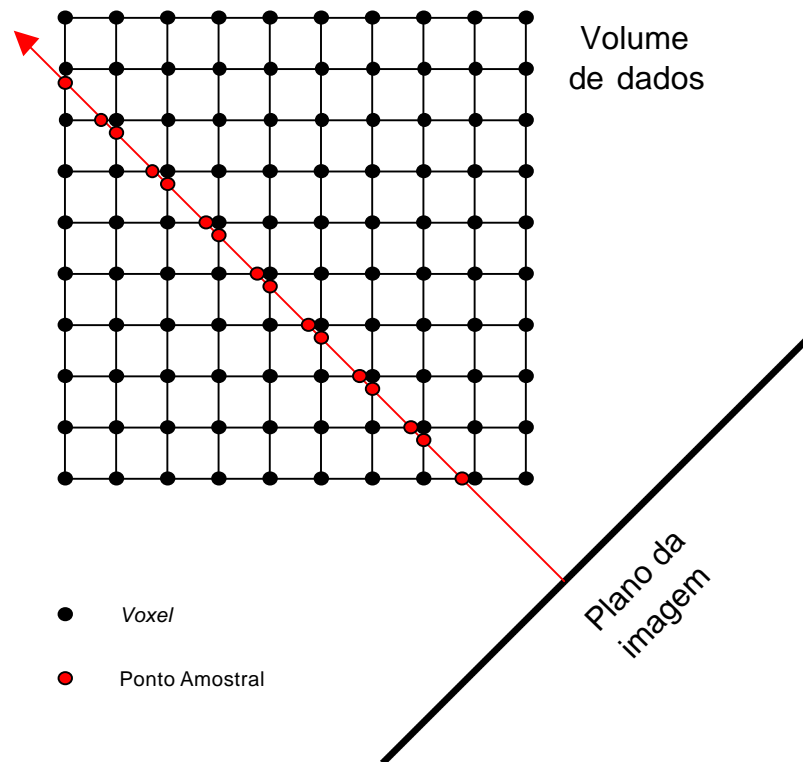


Figura 4.3 - Reamostragem ao longo de uma linha de visada. Os pontos amostrais são posições em que é aplicada a reconstrução para valores de intensidade, opacidade e cor.

Funções de reconstrução de ordem mais alta também podem ser utilizadas para melhor definir $f(x,y,z)$. Uma das mais empregadas é a interpolação trilinear, que assume uma variação linear dos valores ao longo dos eixos principais. Métodos lineares garantem a continuidade da variável escalar, mas não de suas primeira e segunda derivadas. Como consequência, o gradiente de uma superfície presente no volume de dados pode gerar discontinuidades quando se cruza o limite de um *voxel*. O uso de funções de interpolação de ordem ainda mais alta é uma alternativa para garantir uma maior continuidade. Funções como *splines*, *splines* cúbicas ou *sinc* produzem resultados melhores às custas de uma maior complexidade computacional. Reconstruções estatísticas, como as baseadas em krigagem, também podem ser usadas, embora exijam um grande esforço computacional e a interpretação prévia de variogramas. Estas técnicas de interpolação são comparadas por Bentum (1996) sob a ótica de diversos critérios: taxa de convergência, comportamento no domínio da frequência, complexidade computacional, inspeção visual e erros na imagem final. Embora a escolha da técnica utilizada

dependa da precisão requerida pela aplicação, a função *spline* cúbica é a que melhor atende a todos os critérios, exceto ao de complexidade computacional, sendo portanto indicada para situações em que uma imagem mais precisa justifique o seu uso.

4.2.2 A equação de visualização volumétrica direta

A visualização volumétrica direta é uma simulação da propagação da luz através de um meio representado pelo volume, que pode ser considerado como um bloco formado por um gel semitransparente colorido, cuja cor e opacidade são funções das suas amostras. O objetivo fundamental é estimar uma aproximação da equação de transporte, que considera que a interação entre a luz e o gel se dá através de absorção, espalhamento e reflexão. A hipótese de baixo albedo (refletividade) é geralmente empregada (Blinn, 1982; Sabella, 1988; Levoy, 1988). Neste modelo, um único nível de dispersão é considerado, o que permite efetuar uma série de simplificações.

A equação que define a cor de um *pixel* (u,v) pode ser obtida integrando as contribuições de cor de cada um dos *voxels* interceptados pelo raio r ilustrado na Figura 4.4. Por simplicidade de notação, admite-se aqui que esta cor é representada por um valor entre zero e um, podendo expressar um tom de cinza ou uma das componentes RGB de cor.

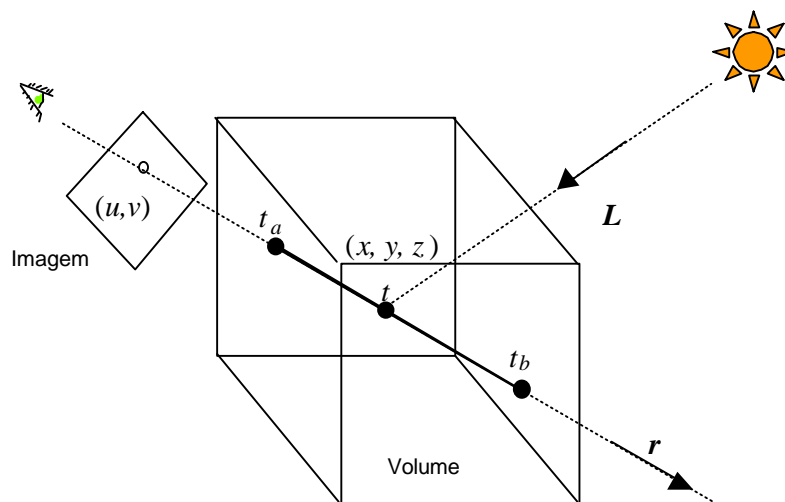


Figura 4.4 - Raio que calcula a cor de um *pixel*.

Supondo que a luz emitida na posição t seja atenuada até atingir o plano da imagem, de acordo com o modelo de absorção da Figura 4.5, na qual I é a quantidade de luz emitida por unidade comprimento de raio que atravessa o volume cilíndrico de área A_t e altura Δs onde existem n partículas de área A_p que impedem a sua passagem.

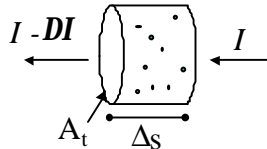


Figura 4.5 - Modelo de absorção.

Admitindo que quando a altura Δs é pequena as partículas não obscurecem umas às outras, a atenuação da energia luminosa pode ser calculada por:

$$\Delta I = -\frac{nA_p}{A_t} I = -\frac{(\mathbf{r}(s)A_t\Delta s)A_p}{A_t} I = -\mathbf{r}(s)A_p I \Delta s = -\mathbf{a}(s)I \Delta s,$$

sendo $\mathbf{r}(s)$ a densidade de partículas opacas e $\mathbf{a}(s) = \mathbf{r}(s)A_p$ o coeficiente de oclusão por unidade de comprimento ao longo do raio. No limite em que Δs tende para zero, tem-se:

$$\frac{dI}{ds} = -\mathbf{a}(s)I,$$

que integrada resulta em:

$$I_t = I(t) \mathbf{a}(t) e^{-\int_{t_A}^t \mathbf{a}(s) ds}$$

A integração de todas as contribuições I_t ao longo do raio r de t_a até t_b resulta na intensidade da cor do *pixel* (u,v) , definida por:

$$I_{u,v} = \int_{t_a}^{t_b} I(t) \mathbf{a}(t) e^{-\int_{t_a}^t \mathbf{a}(s) ds} dt, \quad (4.1)$$

em que:

- $I(t)$ é o termo da fonte ou função intensidade volumétrica, que determina a quantidade de luz adicionada por partição Δt_i ao longo do raio devido à emissão, espalhamento e reflexão. O valor deste termo é definido por uma função de transferência de cores $s(f)$, fornecida pelo usuário, que especifica os valores RGB ou os tons de cinza associados ao gel semitransparente. Modelos mais sofisticados incluem efeitos de tonalização segundo um modelo de iluminação aplicado (discutido na próxima Seção);
- $\alpha(s)$ é o coeficiente de absorção, correspondente à atenuação de luz por partição Δt_j ao longo do raio devido ao espalhamento e extinção. Esse termo é responsável pela oclusão e é definido, segundo o modelo de Levoy (1988), por uma função de transferência de opacidades $\alpha(f)$, também fornecida pelo usuário. É comum incluir o gradiente ∇f como um parâmetro adicional para realçar limites entre os materiais (Levoy, 1988).

Para se obter uma formulação discreta da equação (4.1), a integral externa pode ser avaliada numericamente tomando a intensidade I_i e a opacidade \mathbf{a}_i nos pontos de amostragem i ao longo do raio r . Empregando uma soma de Riemann sobre uma partição $t_i = t_a < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n = t_b$ é possível re-escrever a equação (4.1) como:

$$I_{u,v} = \sum_{i=a}^b I_i \mathbf{a}_i \Delta t_i e^{-\sum_{j=a}^{i-1} \mathbf{a}_j \Delta t_j} = \sum_{i=a}^b S_i \mathbf{a}_i \prod_{j=a}^{i-1} e^{-\mathbf{a}_j} \quad (4.2)$$

Assumindo que a opacidade \mathbf{a}_i é limitada ao intervalo $[0,1]$, é possível obter uma aproximação de primeira ordem da expansão em série de Taylor do termo exponencial como $e^{-\mathbf{a}_j} \cong (1 - \mathbf{a}_j)$, o que leva à forma final da equação de intensidade ao longo de um raio:

$$I_{u,v} = \sum_{i=a}^b S_i \mathbf{a}_i \prod_{j=a}^{i-1} (1 - \mathbf{a}_j).$$

A composição é a avaliação recursiva da Equação (4.2). Utilizando o operador *over* da composição digital (Porter & Duff, 1984), tem-se:

$$\begin{aligned} I_{u,v} &= \sum_{i=0}^{n-1} S_i \mathbf{a}_i \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \mathbf{a}_j) \\ &= S_0 + S_1(1 - \mathbf{a}_0) + S_2(1 - \mathbf{a}_0)(1 - \mathbf{a}_1) + \dots \\ &\quad + S_{n-1}(1 - \mathbf{a}_0) \dots (1 - \mathbf{a}_{n-2}) \\ &= S_0 \text{ over } S_1 \text{ over } S_2 \text{ over } S_3 \dots \text{ over } S_{n-1} \end{aligned}$$

As sucessivas aplicações do operador *over* estimam a equação (4.2) com $O(n)$ operações, ao invés das $O(n^2)$ requeridas por um algoritmo de força bruta. Devido à associatividade desse operador, a composição de quatro intensidades S_i pode ser calculada de duas maneiras diferentes, dependendo da ordem em que a composição ocorre em relação ao observador (Wittenbrink, 1993):

de frente para trás (*front-to-back*): $I = (((S_1 \text{ over } S_2) \text{ over } S_3) \text{ over } S_4)$,

ou

de trás para a frente (*back-to-front*): $I = (S_1 \text{ over } (S_2 \text{ over } (S_3 \text{ over } S_4)))$.

A composição pode ser expressa algorítmicamente utilizando uma expressão recursiva. A formulação de frente para trás é dada por:

$$I_{out} = I_{in} + S_i \mathbf{a}_i (1 - \mathbf{a}_{in}),$$

$$\mathbf{a}_{out} = \mathbf{a}_{in} + \mathbf{a}_i(1 - \mathbf{a}_{in}),$$

onde I_{out} e \mathbf{a}_{out} apontam para a iteração corrente, I_{in} e \mathbf{a}_{in} são os resultados acumulados das iterações anteriores e S_i e \mathbf{a}_i correspondem à intensidade e opacidade da amostra corrente, respectivamente. No caso da composição de trás para a frente não é necessário armazenar as opacidades incrementais, ficando a recursividade reduzida a:

$$I_{out} = S_i \mathbf{a}_i + I_{in}(1 - \mathbf{a}_i)$$

Na prática existem diversas outras alternativas de composição volumétrica (Pfister, 1996), entre elas: raios-X ou soma ponderada, que correspondem à soma de todas as intensidades ao longo de \mathbf{r} ; mip (*maximum intensity projection*), que assume o maior valor encontrado; e simplificações do tipo projeção opaca, em que uma amostra é considerada totalmente opaca ou transparente.

4.2.2.1 Determinação da radiância de uma amostra

A radiância descreve a densidade da energia transmitida pelos fótons em um ponto específico segundo uma direção dada. Os modelos de iluminação usados em computação gráfica são classificados como globais e locais. Os modelos globais procuram modelar as interações luminosas entre todos os objetos de uma cena, incluindo aqueles que são não-emissivos. Entretanto, o custo computacional é extremamente elevado, comprometendo o seu uso generalizado. Além disso, certos efeitos introduzidos por estes modelos (*e.g.*, sombras) podem atrapalhar a interpretação de dados sísmicos, sendo portanto indesejáveis e não considerados neste trabalho. Já os modelos de iluminação locais computam apenas as reflexões difusa e especular da luz emitida por todas as fontes luminosas que atingem diretamente uma superfície contida no volume de dados.

Para a maioria das aplicações práticas, o modelo empírico de iluminação/reflexão de Phong (Phong, 1975) é adequado. Nele todos os cálculos são baseados apenas no conhecimento do vetor normal à superfície (N), da direção de visada do observador (E) e das direções das i

fontes pontuais de luz (L_i), bem como dos parâmetros de reflexão e absorção da superfície e cor da fonte luminosa (Figura 4.6).

O modelo de Phong separa a luz refletida por uma superfície em três componentes:

- luz **ambiente**, que representa a interação global das fontes secundárias (inter-reflexão de superfícies não emissoras) desconsideradas no modelo de iluminação local. Trata-se de um termo constante que depende apenas do produto do coeficiente de reflexão ambiente k_a da superfície pela cor da luz ambiente I_a ;
- luz **difusa**, que representa a reflexão que irradia de forma homogênea em todas as direções. Como a reflexão difusa depende apenas do fluxo de energia (obtido pelo produto interno $N \cdot L$) e do coeficiente de reflexão difusa k_d da superfície, a quantidade deste componente independe da posição do observador, sendo expressa por:

$$I_d = I_l k_d (N \cdot L),$$

onde I_l é a intensidade da fonte luminosa;

- luz **especular**, que representa o brilho típico de superfícies metálicas ou polidas. O cálculo deste componente envolve uma custosa exponenciação de um produto interno ($E \cdot R$) dependente da posição do observador e do ângulo de incidência na superfície, sendo expresso por:

$$I_s = I_l k_s (E \cdot R)^n,$$

onde k_s é o coeficiente de reflexão especular da superfície, R o vetor normalizado de reflexão e n o expoente de reflexão especular ($0 \leq n \leq \infty$).

A combinação dos três componentes resulta na expressão do modelo de iluminação de Phong (Phong, 1975):

$$I = I_a k_a + \frac{I_l (k_d (N \cdot L) + k_s (E \cdot R)^n)}{D},$$

onde D é a distância entre o observador e o objeto, que modela a perda de energia por espalhamento geométrico. A intensidade final deve ser calculada para cada comprimento de onda da fonte luminosa, o que na prática é feito com base no modelo RGB de cor. Uma aproximação do modelo de iluminação de Phong, que evita encontrar o vetor R , é dada por:

$$I = I_a k_a + \frac{I_l (k_d (L \cdot N) + k_s (N \cdot H)^n)}{D},$$

onde H é o vetor normalizado de “meio ângulo” (Blinn, 1977) ou de direção de realce máximo, calculado por:

$$H = \frac{(L + E)}{|L + E|}$$

Esta aproximação é válida somente quando E , L e N são coplanares ou próximos disso.

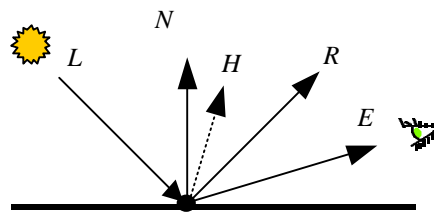


Figura 4.6 - Vetores usados no modelo de reflexão de Phong (1975).

O custo computacional envolvido no recálculo do modelo de iluminação devido à mudança de orientação da visada e/ou da luz é substancial. Entretanto, na maioria das aplicações de visualização volumétrica o componente especular pode ser desconsiderado se for admitida

alguma perda perceptual. Dessa forma, a expressão de Phong fica independente da direção de visada e pode ser simplificada para:

$$I = I_a k_a + k_d \sum_j [(N \cdot L_j) I_j], \quad (4.3)$$

existindo j fontes luminosas, sendo L_j e I_j a direção e a intensidade de cada uma delas, respectivamente. Note-se que a intensidade I desta equação corresponde ao termo da fonte S_x da equação (4.2) e deve ser calculada para cada componente RGB de todas as amostras ao longo do raio r (Figura 4.4).

O cálculo da equação (4.3), no entanto, pode ser feito em uma etapa preliminar, desde que a(s) luz(es) permaneça(m) fixa(s) em relação ao volume de dados. O resultado perceptual desta simplificação é que as luzes giram junto com o volume quando se modifica a direção de visada. Com uma boa distribuição de luzes e uma intensidade ambiente adequada, este efeito é em geral bem tolerado em benefício do ganho de desempenho obtido.

4.2.3 Estimativa do vetor normal

Uma observação importante a ser feita sobre os modelos de iluminação local é a sua total dependência aos vetores normais às superfícies. Os demais parâmetros de iluminação ou são conhecidos ou podem ser facilmente determinados/aproximados. Portanto, a estimativa dos vetores normais é um ponto fundamental.

O vetor normal unitário N de uma superfície implícita $f(x,y,z)$ pode ser calculado a partir do seu gradiente, conforme:

$$N = \frac{\nabla f(x, y, z)}{|\nabla f(x, y, z)|}$$

Um método comum de estimativa de vetores normais é o *normalized gray-level gradient* (Hoehne *et al.*, 1990). Esta técnica produz uma faixa dinâmica razoável calculando o

gradiente diretamente a partir dos valores dos *voxels*, possibilitando uma tonalização contínua das superfícies gerando uma imagem final bastante realista. O esquema de aplicação mais simples emprega um operador de diferenças finitas centrado nos nós da malha tridimensional, definido por:

$$\nabla f(x_i, y_j, z_k) = \begin{cases} [f(x_{i+1}, y_j, z_k) - f(x_{i-1}, y_j, z_k)] / (2\Delta x), \\ [f(x_i, y_{j+1}, z_k) - f(x_i, y_{j-1}, z_k)] / (2\Delta y), \\ [f(x_i, y_j, z_{k+1}) - f(x_i, y_j, z_{k-1})] / (2\Delta z), \end{cases}$$

O cálculo do gradiente de primeira ordem (seis vizinhos) é sensível ao ruído e gera artefatos de *aliasing*; portanto, é desejável o uso de um gradiente de segunda ordem (vinte e seis vizinhos) (Figura 4.7), que reduz a sensibilidade ao ruído, apesar de ter um maior custo computacional. Esta abordagem (Zucker & Hummel, 1981) emprega uma média ponderada das diferenças centrais ao longo dos eixos principais e das diagonais.

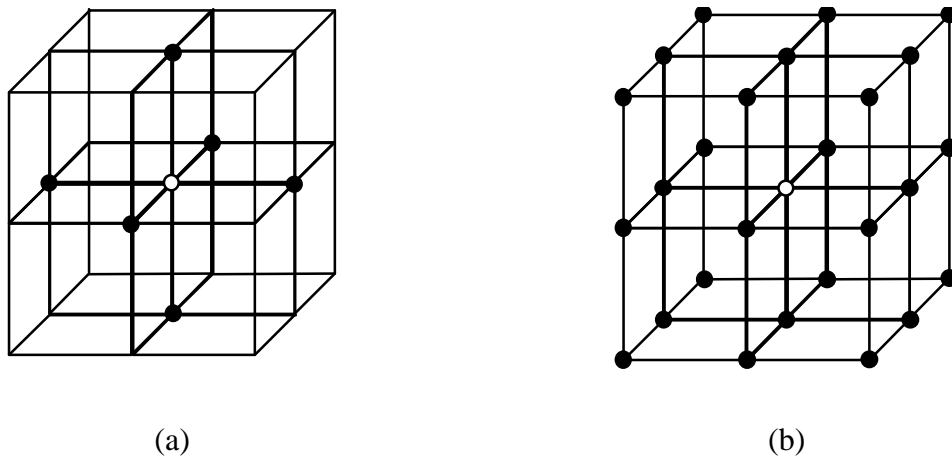


Figura 4.7 - Operadores de diferenças finitas de (a) primeira ordem (6 vizinhos) e (b) segunda ordem (26 vizinhos) para o cálculo do gradiente.

Outras alternativas podem se basear em diferenças finitas intermediárias para a frente e/ou para trás centradas entre os nós da malha tridimensional ao longo dos eixos ortogonais.

Operadores discretos de maior complexidade também podem ser empregados, em geral com melhores resultados. Um estudo extenso de operadores pode ser encontrado em Benthum (1996), que conclui serem as derivadas das *splines* cúbicas os operadores ótimos de estimativa de gradiente, devido ao fato de produzirem pouco *aliasing*, serem adaptativas e promoverem uma suavização dos valores resultantes.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para estimar o vetor normal a partir do gradiente calculado diretamente a partir dos *voxels*. A maioria deles (*e.g.*, Levoy, 1988) efetua os cálculos apenas nos nós da malha tridimensional, obtém a tonalização baseada no modelo de iluminação e armazena a cor resultante nessas posições. Entretanto, os pontos amostrais podem não coincidir com os *voxels*, sendo necessária alguma forma de reconstrução. A cor associada a um ponto amostral arbitrário no *voxel* pode ser determinada por interpolação trilinear a partir dos valores calculados previamente nos nós da malha tridimensional, o que constitui essencialmente o método de interpolação de cor de Gouraud (Gouraud, 1971). Um método mais preciso utiliza interpolação ponderada dos vetores normais seguida de tonalização, conhecido como método de interpolação de vetores normais de Phong (Phong, 1975). Apesar de requerer um esforço computacional maior que o esquema de Gouraud, o método de Phong produz resultados em geral muito superiores.

Encontrar um equilíbrio eficiente entre o nível de ruídos e a suavização dos gradientes é essencialmente um problema de análise espaço-escala. Técnicas deste tipo têm apresentado resultados notáveis aplicando métodos baseados em difusão não-linear anisotrópica ao processamento de imagens (El-Fallah *et al.*, 1995) e a dados de ultra-sonografia 3D (Steen & Olstad, 1994), embora com um custo computacional ainda elevado. Outros métodos baseados em análise multi-escala no domínio da transformada *wavelet* também se mostram promissores (Westermann & Ertl, 1997).

4.2.4 Classificação dos algoritmos de visualização volumétrica direta

Uma importante classificação dos algoritmos de visualização volumétrica direta é feita de acordo com a ordem em que os *voxels* são processados a fim de gerar a imagem final. Três

categorias de métodos são conhecidas: **ordem da imagem**, **ordem dos objetos** e os baseados em **transformação de domínios** (Levoy, 1991; Kaufman, 1997). Alguns algoritmos podem ser considerados híbridos por combinar dois ou mais destes métodos.

4.2.4.1 Ordem da imagem

Os algoritmos do tipo ordem da imagem percorrem o espaço da imagem final determinando quais *voxels* do volume de dados contribuem para a composição da cor de cada *pixel*. A relação entre o plano da imagem e o volume de dados é definida pela transformação projetiva empregada, que resulta em amostras no volume de dados que muito provavelmente não coincidem com os nós da malha, sendo necessária alguma forma de reconstrução.

Um algoritmo representativo desta classe é o *ray-casting*. Ele trabalha lançando um ou mais raios a partir de cada *pixel* da imagem final através do volume de dados e integrando as contribuições de cor e opacidade dos *voxels* atravessados, segundo a equação (4.2), até que o(s) raio(s) deixe(m) o volume ou acumule(m) uma opacidade total. A cor e a opacidade calculadas são então armazenadas no *pixel* correspondente e o processo é repetido para o *pixel* vizinho até que toda a imagem tenha sido percorrida (Figura 4.8). A estrutura de um algoritmo desta classe é definida por:

```

para  $y_i = 1$  até Altura da Imagem
  para  $x_i = 1$  até Largura da Imagem
    para  $z_i = 1$  até Comprimento do Raio
      para cada  $x_0$  no Filtro de Reconstrução  $(x_i, y_i, z_i)$ 
        para cada  $y_0$  no Filtro de Reconstrução  $(x_i, y_i, z_i)$ 
          para cada  $z_0$  no Filtro de Reconstrução  $(x_i, y_i, z_i)$ 
            acumule a contribuição do Voxel $[x_0, y_0, z_0]$  no Pixel $[x_i, y_i]$ 

```

Os dois laços mais externos iteram sobre os *pixels* da imagem. O terceiro laço itera sobre os pontos amostrais ao longo do raio. Os três laços mais internos iteram sobre os *voxels* requeridos pelo filtro de reconstrução para gerar a contribuição da amostra ao *pixel* no espaço da imagem.

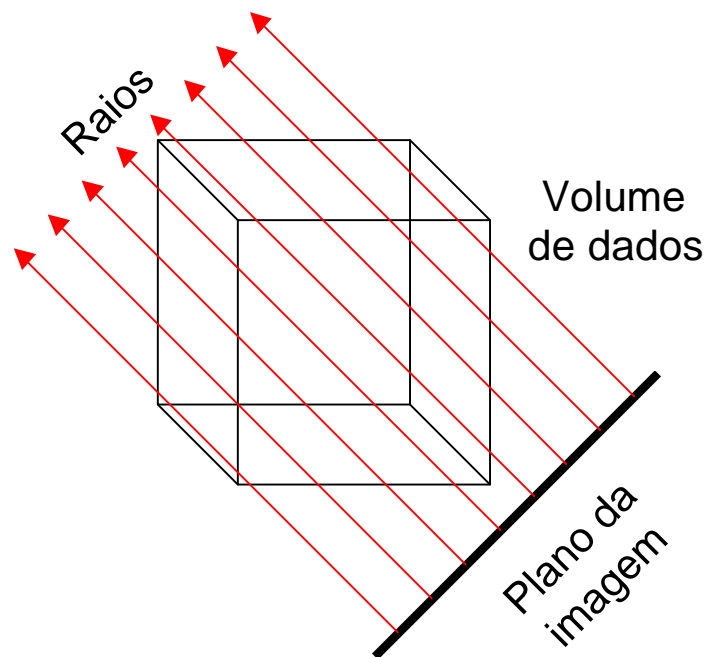


Figura 4.8 - Algoritmo *ray-casting*.

Os métodos desta classe geralmente diferem na maneira de determinar as amostras ao longo do raio discreto. Três alternativas conhecidas são:

- representar apenas as células mais próximas ao raio (Kaufman, 1988);
- amostrar o volume nas interseções do raio com as faces dos *voxels* (Upton & Keeler, 1988);
- usar uma interpolação trilinear ou de ordem mais alta em intervalos regulares ao longo do raio (Levoy, 1988).

A principal desvantagem do algoritmo *ray-casting* é o acesso aleatório do volume de dados, uma vez que os raios podem seguir uma direção arbitrária. Como resultado, os algoritmos deste tipo gastam boa parte de seu tempo de computação calculando a posição espacial dos pontos amostrais ao longo dos raios e determinando os *voxels* a que esses pontos pertencem. Contudo, o *ray-casting* pode ser facilmente paralelizável (Seixas, 1997) e é simples de ser implementado.

Uma variante do *ray-casting* (Sabella, 1988) modela os *voxels* como partículas emissoras de luz, computando quatro valores para cada raio: intensidade luminosa, luminosidade máxima, distância ao valor máximo e o centróide dos *voxels* atravessados. A cor é definida no sistema HSB, em que o componente da matiz (*hue*) está relacionado à amplitude máxima, a saturação é utilizada para gerar um efeito de profundidade e o brilho é uma função da intensidade luminosa. A abordagem dispensa a especificação de uma classificação explícita, uma vez que o resultado da varredura de cada raio através do volume é fortemente dominado pela amplitude máxima. As imagens geradas apresentam caráter semelhante às obtidas com o método *mip* (*maximum intensity projection*), no qual o valor do *pixel* é representado pelo maior valor ao longo do raio, sendo portanto adequadas à identificação de máximos. Sua principal limitação é não permitir a oclusão, conferindo um aspecto de radiografia à imagem final.

4.2.4.2 Ordem do objeto

Os algoritmos do tipo ordem do objeto percorrem o volume de dados determinando os *pixels* que são afetados pela projeção de cada *voxel* no plano da imagem. A acumulação sucessiva das contribuições dos *voxels* contidos em cada linha/coluna do volume de dados, feita no sentido de trás para a frente (*back-to-front*) em relação ao observador, compõe a imagem final.

Um algoritmo representativo desta classe é o *splatting* (Westover, 1990). Ele percorre o volume de dados distribuindo o valor da contribuição de cada *voxel* sobre o plano da imagem final utilizando um filtro de reconstrução (*footprint*) (Figura 4.9). A estrutura dos algoritmos desta classe é definida por:

```

para  $z_0 = 1$  até Profundidade do Volume
  para  $y_0 = 1$  até Altura do Volume
    para  $x_0 = 1$  até Largura do Volume
      para cada  $z_i$  no Filtro de Reconstrução  $(x_0, y_0, z_0)$ 
        para cada  $y_i$  no Filtro de Reconstrução  $(x_0, y_0, z_0)$ 
          para cada  $x_i$  no Filtro de Reconstrução  $(x_0, y_0, z_0)$ 
            acumule a contribuição do Voxel $[x_0, y_0, z_0]$  no Pixel $[x_i, y_i]$ 

```

Em comparação com o algoritmo *ray-casting*, os laços internos e externos estão intercambiados. Os três laços externos iteram agora sobre os *voxels*, o laço seguinte itera sobre a extensão do operador de reconstrução na dimensão da profundidade do plano da imagem e os dois últimos laços iteram sobre os *pixels* afetados por um único *voxel*.

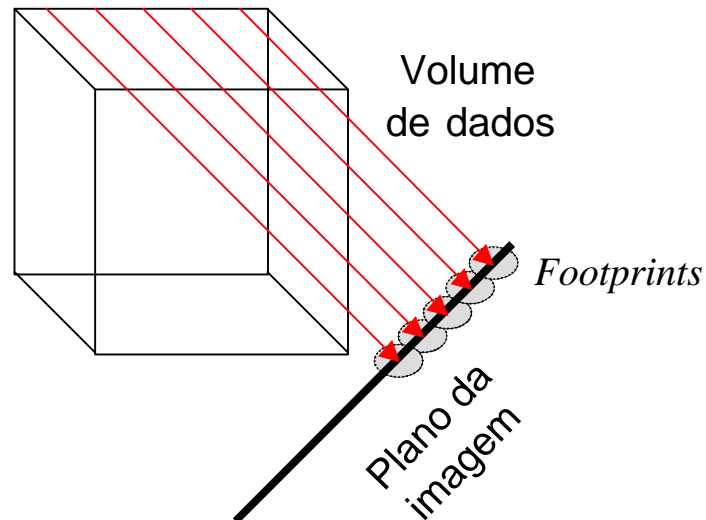


Figura 4.9 - Algoritmo *splatting*.

O algoritmo *splatting* percorre o volume de dados na sua ordem de armazenamento, o que representa uma vantagem em comparação ao *ray-casting*. A desvantagem do método é o alto custo computacional do filtro de reconstrução, já que este é dependente do ponto de vista. O filtro ideal pode ser aproximado limitando a convolução a apenas duas dimensões e precomputando operadores gaussianos invariantes que são armazenados em tabelas (Westover, 1990). O tamanho do operador deve ser escolhido com cuidado para evitar a geração de vazios, comuns em imagens maiores que a maior dimensão do volume, ou a superposição excessiva de *voxels* adjacentes quando projetados sobre a imagem. O método pode ser calibrado para obter ou um bom desempenho ou uma alta qualidade de imagem, sendo ambos mutuamente excludentes. Entretanto, o *splatting* pode se valer de técnicas de refinamento progressivo (Laur & Hanrahan, 1991) e é facilmente paralelizável.

4.2.4.2.1 Algoritmos baseados em mapeamento de texturas

Alguns algoritmos alternativos do tipo ordem do objeto utilizam técnicas de *warping* de imagens. É o caso do *texture-mapping* (Wilson *et al.*, 1994; McReynolds *et al.*, 1997), algoritmo que gera um novo volume na memória de textura a partir dos dados originais. A textura é então classificada, mapeada em polígonos e particionada em fatias bidimensionais. Um filtro de *warping* 2D transforma cada fatia para o plano da imagem, onde elas são então compostas (Figura 4.10). É empregado o mesmo esquema de ordenação dos laços do algoritmo *splatting* padrão, exceto que a terceira dimensão (z_i) é omitida, já que o filtro de reconstrução é bidimensional. Dessa forma, o método reduz a complicada reconstrução do algoritmo *splatting* a um problema mais tratável de *warping* 2D. Contudo, o operador do filtro permanece dependente da visada, mantendo um equilíbrio entre qualidade da imagem e desempenho.

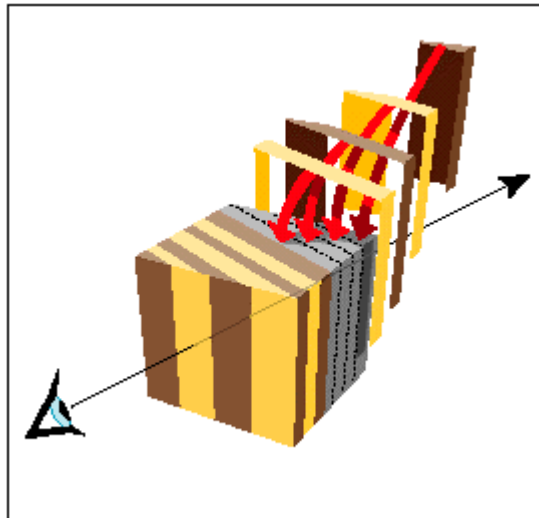


Figura 4.10 - Esquema do algoritmo *texture-mapping* (McReynolds *et al.*, 1997).

A grande vantagem deste algoritmo reside no fato dele fazer uso de bibliotecas gráficas que garantem um alto desempenho de mapeamento de textura utilizando *hardware* especial. Suas principais limitações são a pequena quantidade de memória de textura disponível nos *hardware* atuais e a impossibilidade de suportar um modelo de iluminação. Se a memória de

textura não for suficiente para armazenar todo o volume de dados, este deve ser particionado e carregado à medida que for solicitado, causando degradação de desempenho e tornando a implementação complexa. A limitação desta memória a 8 ou 12-bit pode causar erros de arredondamento que podem se tornar significativos à medida que as fatias de textura são acumuladas, especialmente na versão 8-bit. A impossibilidade de computar os vetores normais impede o uso de modelos de iluminação mais sofisticados, diminuindo a percepção tridimensional na imagem final.

4.2.4.3 Algoritmos híbridos

O algoritmo *V-buffer* (Upton & Keeler, 1988) segue uma varredura do volume organizado por células (tendo os *voxels* como vértices), mas em cada célula aplica uma técnica similar ao *ray-casting*, o que o torna um método híbrido. O processo se inicia no plano e na célula mais próximos do observador e avança plano a plano na direção do aumento de distância. Para cada célula são determinados quais os *pixels* afetados pela sua projeção em cada linha da imagem, e para cada *pixel* é efetuada uma integração da intensidade ao longo da célula, que é mapeada para cor e tonalizada a partir de interpolação dos vértices.

Um algoritmo baseado no cisalhamento do volume de dados foi originalmente desenvolvido por Drebin *et al.* (1988). O método efetua três operações seqüenciais de cisalhamento sobre o volume de dados, cada uma paralela a um dos eixos coordenados. Essas operações representam os componentes resultantes da decomposição da matriz de transformação do espaço do objeto para o plano da imagem. Os cisalhamentos permitem que a linha de visada seja transformada de uma linha (geralmente) oblíqua em outra paralela a um dos eixos principais.

Lacroute & Levoy (1995) expandiram o método e propuseram diversas otimizações que compõem o algoritmo *shear-warp factorization*. Ele explora a coerência gerada pelos sucessivos cisalhamentos, expressa pelo alinhamento de linhas de *voxels* no volume e de *pixels* em uma imagem intermediária de baixa resolução. Utilizando um algoritmo do tipo *scanline*, é possível percorrer ambas as linhas em sincronismo e determinar o valor acumulado em cada *pixel* da imagem intermediária. Um filtro de *warping* é aplicado na etapa final para transportar as informações para suas verdadeiras posições (Figura 4.11).

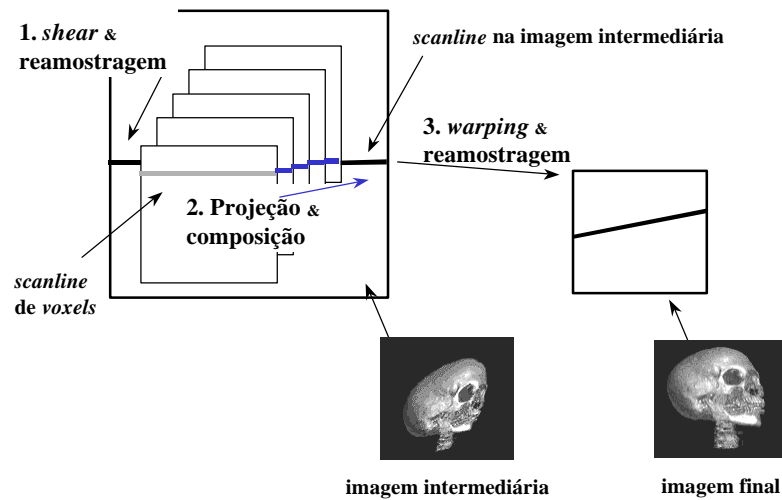


Figura 4.11 - Esquema do algoritmo *shear-warp factorization* (adaptado de Lacroute & Levoy, 1995).

As otimizações implementadas por Lacroute & Levoy (1995), tais como estruturas especiais de dados e codificação, tornam o algoritmo *shear-warp* um dos mais rápidos disponíveis atualmente dentre aqueles que não se beneficiam de aceleração em *hardware*. Uma limitação do método é a sua dependência da visada. Outros problemas ligados à qualidade são apontados por Benthum (1996):

- o algoritmo executa dois passos de reamostragem, podendo resultar em perda de detalhes;
- o filtro de reconstrução aplicado é bidimensional. Nos planos da imagem intermediária é aplicada uma interpolação bilinear, porém entre eles é aplicada apenas uma interpolação de ordem zero;
- o número de raios é igual ao número de *voxels* nas fatias do volume, o que pode gerar *aliasing*.

4.2.4.4 Métodos baseados em transformação de domínios

Os algoritmos desta classe primeiro transformam a informação do volume de dados em outro domínio e, a partir deste, geram a imagem final por projeção direta. Dentre as transformações mais comuns estão Fourier, coseno e *wavelets*.

Os algoritmos que operam no domínio da frequência obtêm a projeção do volume 3D diretamente do espectro dos dados utilizando o Fourier *slice theorem*, reduzindo a complexidade computacional de $O(n^3)$ para $O(n^2 \log n)$ (Levoy, 1992; Malzbender, 1993). A maior limitação deste método é não permitir nem oclusão e nem atenuação, conferindo às imagens um aspecto de radiografia.

A visualização de volumes comprimidos, sem a descompressão de todo o conjunto de dados, reduz o espaço de armazenamento de dados originalmente grandes, característica marcante dos dados sísmicos, e o esforço computacional. Diversos métodos têm sido empregados para comprimir grandes volumes, caso da transformada coseno (Yeo & Liu, 1995). Mais recentemente, o uso da transformada *wavelet* vem ganhando popularidade (Muraki, 1993; Gross *et al.*, 1995; Westermann, 1997), dadas as suas características de localização espaço-temporal e a capacidade de representar, com boa aproximação, grandes volumes de dados utilizando apenas alguns coeficientes de suas representações multi-escala (Luo & Schuster, 1992). Outra possibilidade interessante oferecida pela transformada *wavelet* é a detecção de singularidades, o que permite uma discriminação robusta dos ruídos e uma melhor localização espacial das interfaces (Westermann & Ertl, 1997).

5 Requisitos dos dados sísmicos

Como mencionado anteriormente, a visualização volumétrica de dados sísmicos enfrenta dificuldades que não são encontradas na mesma proporção na visualização de dados médicos. Para superar estes problemas, os métodos de visualização devem atender a um conjunto de requisitos. Este Capítulo aborda três requisitos em maior detalhe: controle da representação digital (quantização), segmentação e estimativa dos vetores normais.

5.1 Quantização

Os dados sísmicos adquiridos são originalmente representados na forma digital como números de ponto-flutuante. Após o processamento sísmico, o volume final é normalmente convertido para 16-bit nas estações de interpretação a fim de economizar espaço de armazenamento em disco. Entretanto, a grande maioria das implementações dos algoritmos de visualização volumétrica trabalha com representação de 8-bit devido a limitações de memória. Essa conversão final implica em uma quantização significativa dos dados, que deve ser aplicada com critério.

Quantização de amplitudes sísmicas é o processo de mapeamento de uma variável contínua em outra discreta que toma valores de um conjunto finito de números. O processo é realizado por uma função de quantização, ou quantizador, que divide a faixa de valores originais em um número limitado de intervalos - as células de quantização. A cada célula é atribuído um valor único - o nível de quantização -, tipicamente alguma forma de média dos valores limite de cada intervalo. O processo é irreversível; a partir de um dado nível de quantização é impossível reconstruir de forma única os valores originais, o que caracteriza a quantização como uma operação de compressão com perdas (Sayood, 1996).

Existem dois tipos de quantização: escalar, em que uma única amostra é processada de cada vez, e vetorial, em que as amostras são processadas em blocos ou vetores. Este trabalho lida somente com quantização escalar. A forma mais simples de quantização escalar é a uniforme, na qual as células de quantização têm largura constante, enquanto que na quantização não-

uniforme a largura das células varia de acordo com algum parâmetro (geralmente estatístico). Quando um quantizador não possui uma célula de quantização centrada em zero, ele é denominado *midrise*, enquanto o que possui é dito *midtread*. Geralmente os quantizadores *midrise* são usados para um número par e os *midtread* para um número ímpar de células de quantização. A Figura 5.1 ilustra um quantizador uniforme tipo *midrise*. Nela também estão representados os erros de quantização associados a cada intervalo.

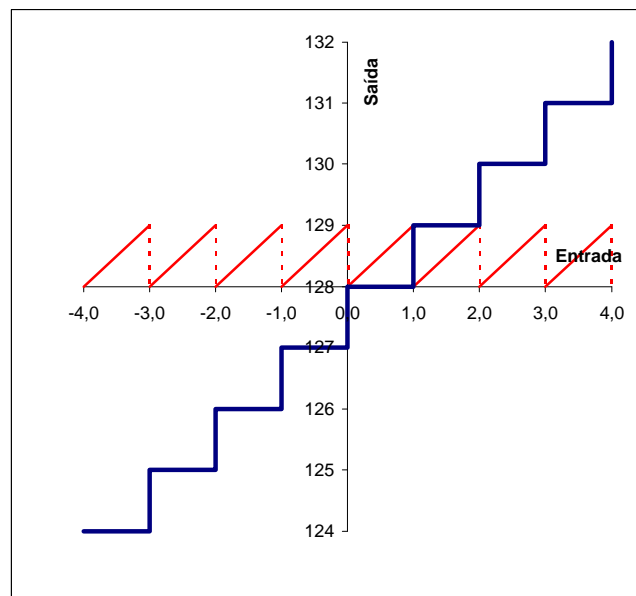


Figura 5.1 - Quantizador uniforme tipo *midrise* (linha azul) com intervalo de quantização unitário e saída em representação de 8-bit. O erro de quantização associado (linha vermelha) varia linearmente entre 0 e 1 dentro de cada intervalo. Apenas oito níveis centrais de quantização estão representados.

Uma das distorções mais importantes do processo de quantização é a redução da faixa dinâmica original. A gama de valores distintos que os dados podem assumir após passarem por um quantizador é bastante restrita. A Figura 5.2 ilustra esquematicamente esta redução utilizando um conjunto simples de dados. A manifestação deste efeito se dá na forma de uma menor variação de frequências no histograma de dados quantizados.

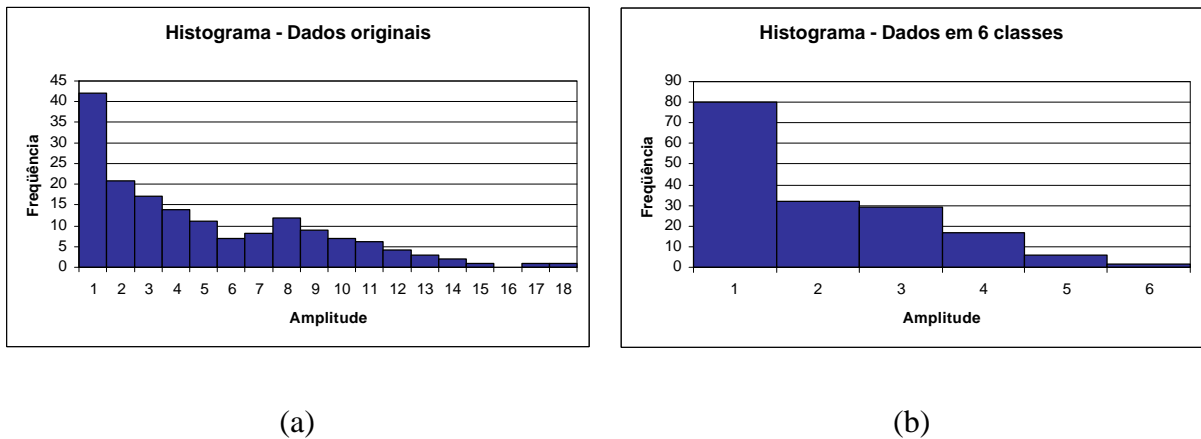


Figura 5.2 - Redução da faixa dinâmica devido à quantização: (a) histograma dos dados originais e (b) quantização para seis classes.

Uma consequência correlata é o fato de que diversos sinais e ruídos acabam por ser misturados em uma mesma célula de quantização, conforme ilustrado no histograma da Figura 5.3 utilizando um conjunto simples de dados. Dessa forma, pode ser impossível discriminar as amplitudes representativas de um evento de interesse após a quantização. A razão sinal-ruído também é afetada. Uma formulação complexa entre a razão sinal-ruído dos valores originais e seus correspondentes quantizados é deduzida por Doyle (1983) para a quantização uniforme. Esta relação é praticamente linear nas quantizações para 16 e 8-bit. Para essas mesmas representações, a distorção é aceitável desde que a razão sinal-ruído dos dados originais esteja abaixo de 40 dB. Acima deste valor a reconstrução dos sinais é fortemente distorcida e assume a forma de “degraus”, indicando a necessidade de estimar a razão sinal-ruído antes do processo de quantização.

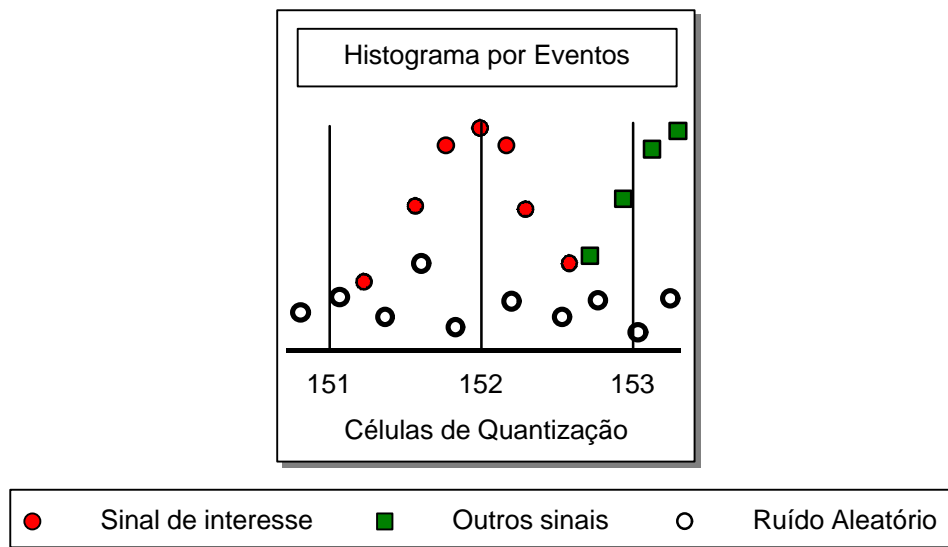


Figura 5.3 - Mistura de informações devido à quantização.

O processo de quantização seria desnecessário se os algoritmos de visualização volumétrica direta trabalhassem com a representação de ponto-flutuante. A fim de avaliar o efeito da distorção gerada pela quantização na imagem final, foi implementada uma variante do algoritmo *ray-casting* que trabalha com dados não quantizados. A Figura 5.5 compara uma imagem gerada por esta variante com outra obtida empregando o algoritmo original de 8-bit. Os dados em representação de 8-bit foram quantizados uniformemente utilizando um esquema *midrise*, que garante o alinhamento das células centrais (127 e 128) com os valores originais imediatamente vizinhos a zero no sentido dos positivos e negativos (Figura 5.1), ou seja, a quantização é feita no intervalo:

$$[-a, +a],$$

$$a = \text{máximo}(|x_{\min}|, |x_{\max}|)$$

onde x_{\min} e x_{\max} são os valores mínimo e máximo dos dados originais, respectivamente. Apesar de poder resultar em algumas células vazias, esse esquema de quantização facilita a referência das amplitudes e o desenho da função de transferência.

A mesma função de transferência de opacidades e o mesmo mapeamento de cores, originalmente desenhados para o algoritmo de 8-bit, foram aplicados a ambas as imagens nas posições limítrofes das células de quantização. No algoritmo de ponto-flutuante foi empregada uma interpolação linear entre os valores de opacidade. Já para a representação de 8-bit, a função é constante por partes, valendo o mesmo nível para toda a célula. Ambas as funções estão representadas na Figura 5.4. Embora as diferenças na Figura 5.5 sejam evidentes, a quantificação da distorção introduzida pela quantização é limitada devido ao desconhecimento do modelo real, sendo baseada apenas em critérios subjetivos.

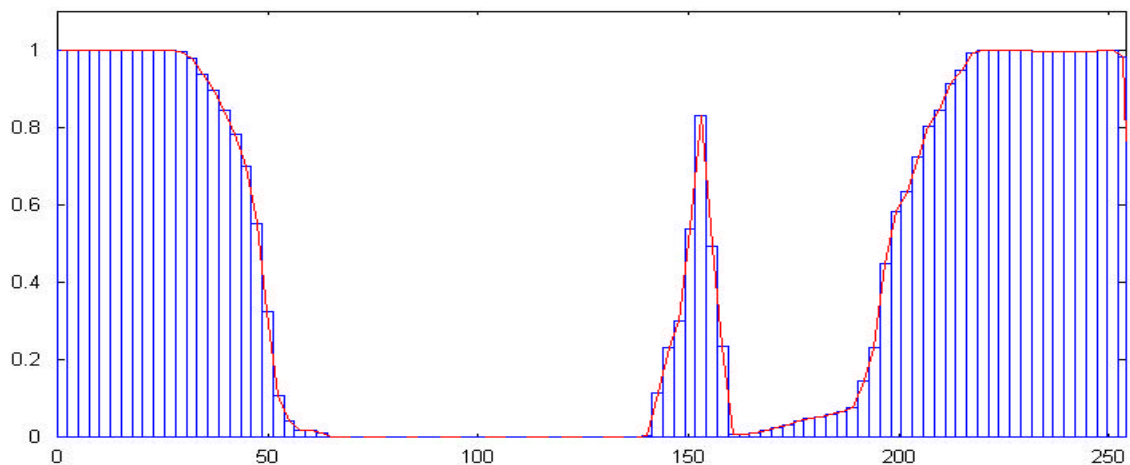


Figura 5.4 - Funções de transferência para diferentes representações de dados: ponto-flutuante – função linear por partes (linha vermelha) – e 8-bit – função constante por partes (barras azuis).

Cabe ressaltar que na prática a quantização é efetivamente aplicada quando do mapeamento dos valores originais dos dados sobre a função de transferência na etapa de classificação. Se a função de transferência usada for constante por partes, o resultado da classificação será o mesmo para dados em representação tanto de ponto-flutuante quanto de 8-bit. O tipo de quantização aplicado depende apenas do número de entradas de cor e opacidade nas *lookup tables*, dos seus intervalos e dos valores por elas referenciados.

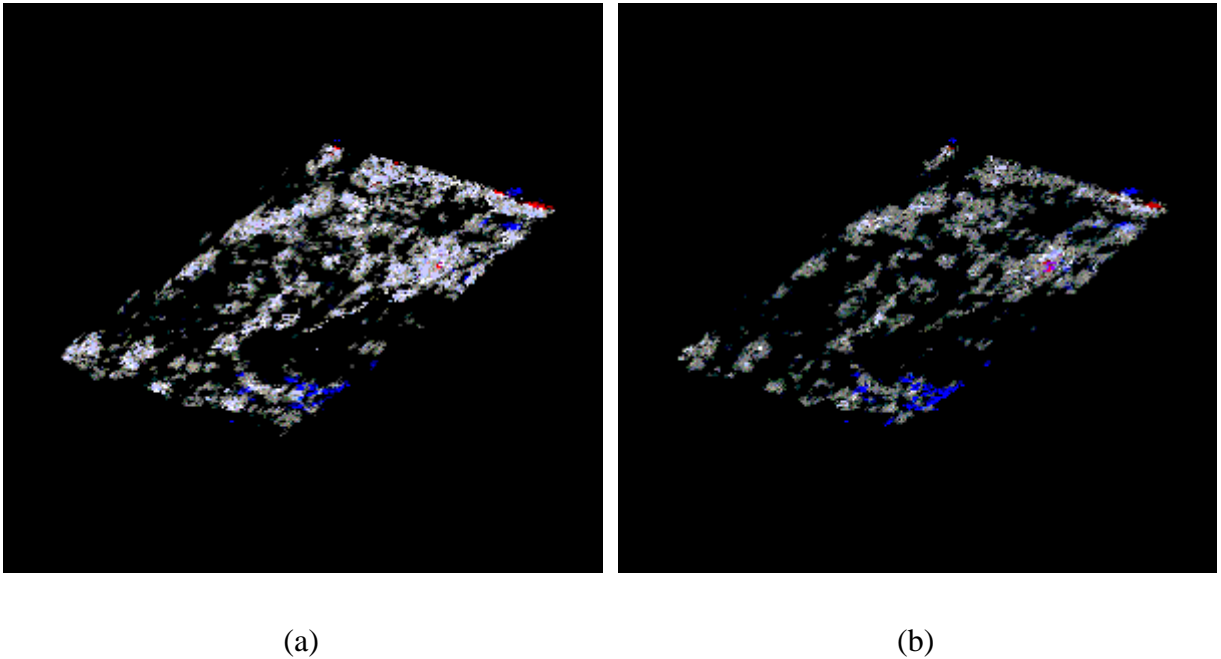


Figura 5.5 - Imagens geradas pelo algoritmo *ray-casting* utilizando a representação de dados de (a) ponto-flutuante e (b) de 8-bit. A mesma função de transferência é usada em ambas as imagens nas posições limítrofes de células de quantização. Na versão de ponto-flutuante é aplicada uma interpolação linear entre esses valores.

Conforme anteriormente indicado, o uso da representação de ponto-flutuante pode garantir uma maior separabilidade dos eventos sísmicos. Entretanto, isso exige uma função de transferência contínua (*e.g.*, *splines*), que, apesar de mais poderosa, é de parametrização mais complexa. A sensibilidade da imagem final à função de transferência (ver Seção 5.2) é bem maior neste caso, o que requer do intérprete uma considerável experimentação com os parâmetros. Outro problema com a representação de ponto-flutuante é que mesmo para volumes da ordem de 256^3 , considerados pequenos do ponto de vista da sísmica, o espaço de armazenamento requerido é de 512 Mbytes, inviabilizando o uso generalizado destes algoritmos nos *hardware* convencionais atuais ou limitando sua aplicação a pequenos subvolumes.

A distorção resultante da quantização é inevitável e deve ser tratada de maneira cautelosa para evitar a degradação das informações. Uma forma de garantir a maior fidelidade possível da representação quantizada é preservar a identidade estatística do conjunto de dados originais

através da minimização do erro médio quadrático obtido da comparação entre estes e seus correspondentes quantizados. Este caso é em geral aplicado quando o resultado da quantização é passado para outros processos numéricos. Por outro lado, alguns esquemas operam sobre os dados originais de modo a realçar classes de interesse ou obter uma distribuição derivada que aumente a perceptividade da informação quando esta é vista como uma imagem. Este é o caso dos algoritmos de quantização de cor utilizados em computação gráfica, área em que não há necessidade de garantir uma identidade estatística, já que o resultado é objeto apenas de visualização.

A quantização de cores é um processo comum em computação gráfica e processamento de imagens, tendo sido tradicionalmente usada para reproduzir imagens em *hardware* gráficos com um número limitado de cores simultâneas em uma *palette* de 8-bit, ao mesmo tempo tentando minimizar os efeitos perceptivos decorrentes das perdas envolvidas no processo. Dentre os algoritmos de quantização mais comuns em computação gráfica estão corte mediano e populosidade. Neste trabalho, ambos foram adaptados para o caso unidimensional e aplicados a um volume de dados sísmicos como alternativas à quantização uniforme.

5.1.1 Algoritmo de populosidade

O algoritmo de populosidade nada mais é que a simples seleção das n classes mais populosas presentes na distribuição de probabilidade original, a qual pode ser aproximada por um histograma com um número muito grande de classes. Todas as demais classes são então mapeadas para a classe populosa mais próxima.

Como as classes que representam as altas amplitudes não se encontram entre as mais populosas em histogramas de dados sísmicos, os resultados obtidos pela aplicação deste algoritmo são desastrosos. A Figura 5.7(c) mostra que os detalhes de amplitude mais alta (em módulo) são totalmente ignorados neste processo de quantização, resultando em uma imagem que carece de realces. O resultado da aplicação deste algoritmo sobre a distribuição de probabilidade original é mostrado na Figura 5.6.

5.1.2 Algoritmo de corte mediano

O algoritmo de corte mediano está fundamentado no conceito de equalização do histograma, um processo bastante comum em processamento de imagens que visa aumentar a perceptividade de detalhes. Ele divide recursivamente o conjunto de amplitudes, tomando a mediana de cada subconjunto como ponto de partida para a próxima subdivisão. O uso da mediana como parâmetro de subdivisão resulta em um achatamento da distribuição de probabilidades, uma vez que o número de amostras atribuídas a cada célula de quantização é aproximadamente o mesmo.

O resultado da aplicação deste algoritmo sobre a distribuição original dos dados é ilustrado na Figura 5.6. O método falhou em horizontalizar por completo o histograma por este ser bastante pontiagudo na origem, apesar de resultar em uma mudança significativa de freqüências relativas. Este efeito não é visível na imagem da Figura 5.7(d), uma vez que a função de transferência usada (Figura 5.9(a)) atribui valores totalmente transparentes às classes próximas a zero, região onde as mudanças foram mais expressivas.

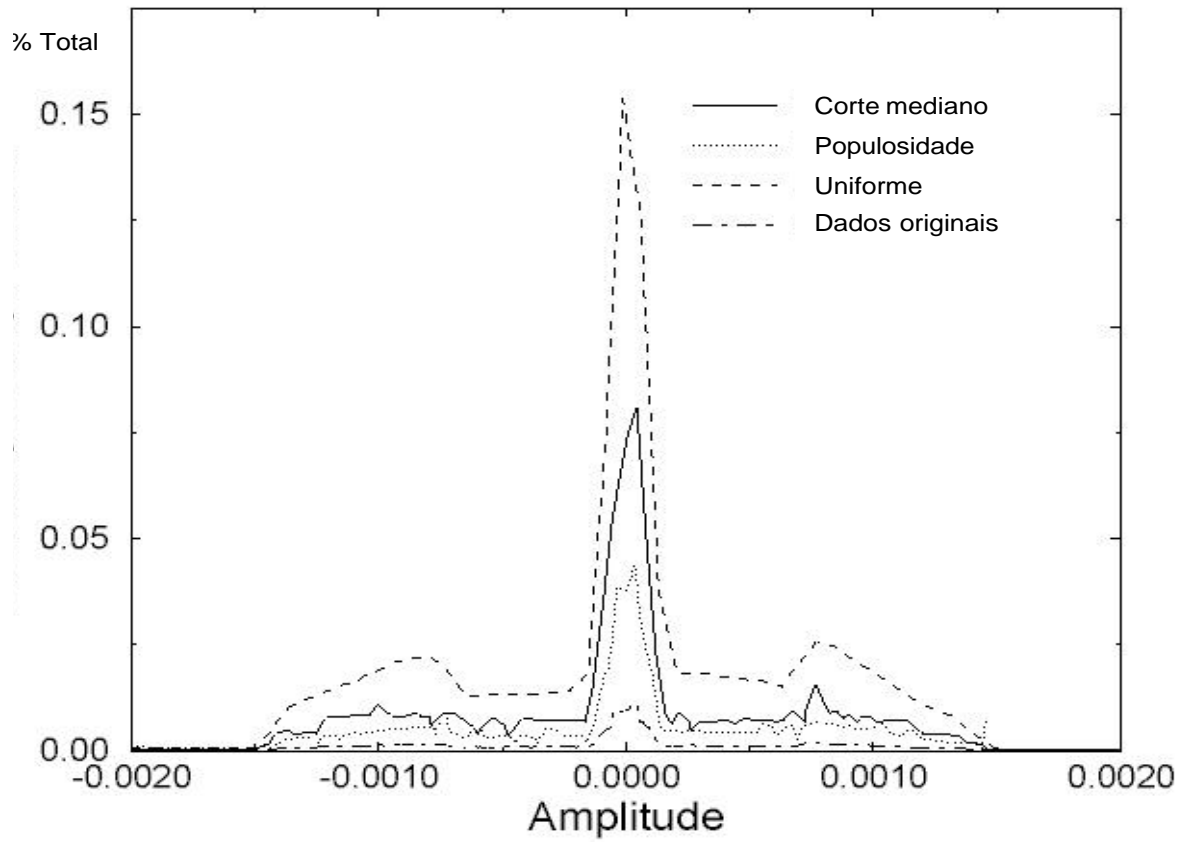
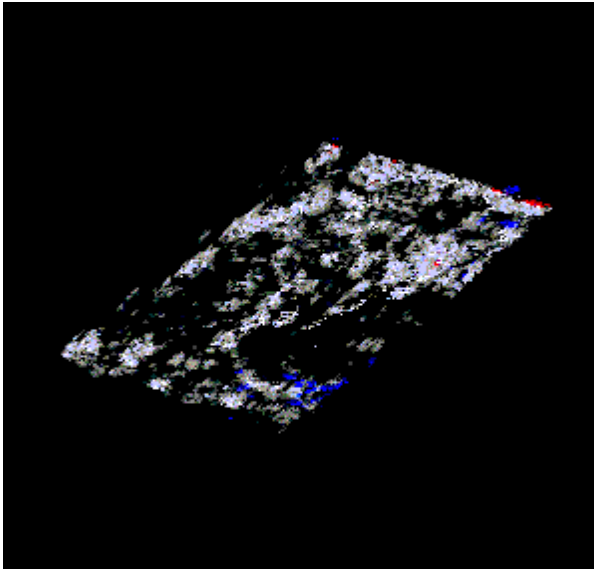
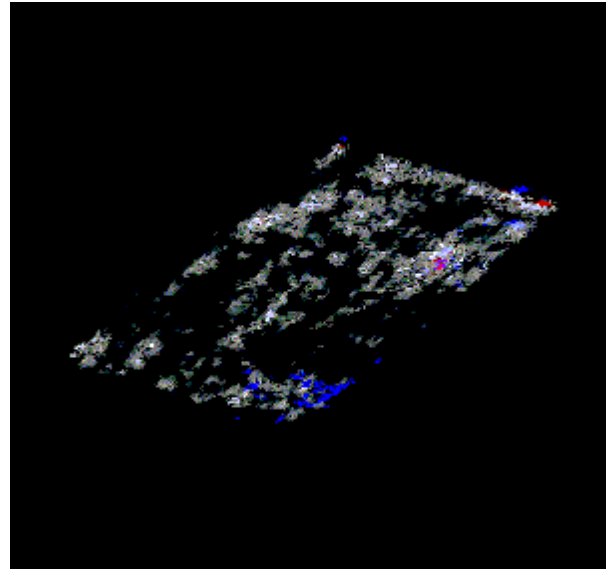


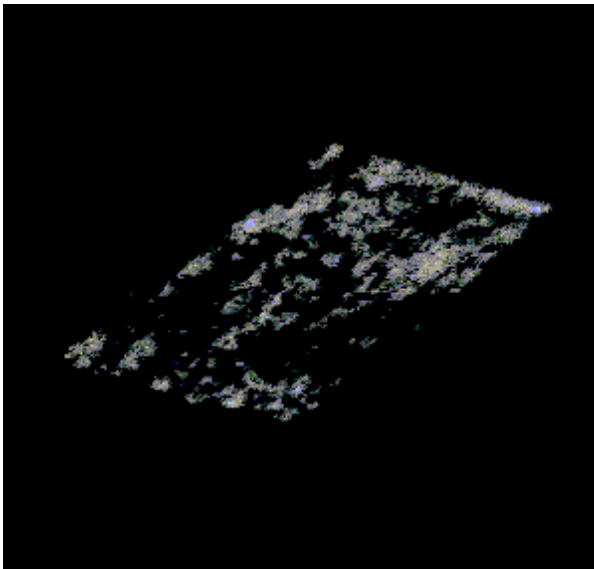
Figura 5.6 - Distribuição de amplitudes dos dados originais e após a aplicação dos algoritmos de quantização uniforme, populosidade e corte mediano.



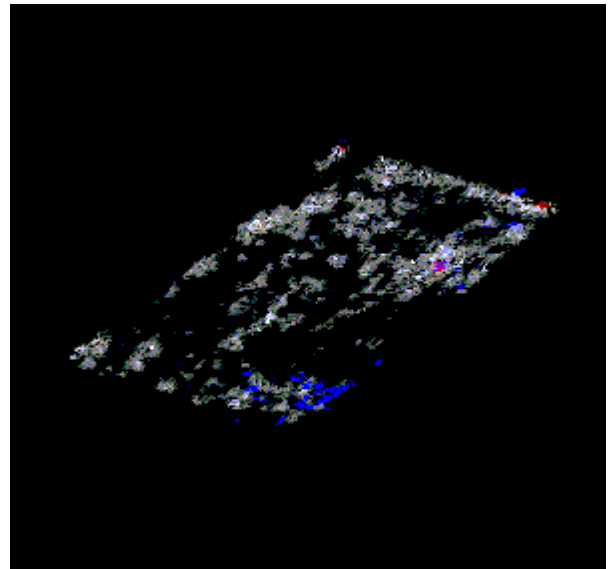
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7 - Imagens geradas com *ray-casting* a partir dos (a) dados originais utilizando os algoritmos de quantização: (b) uniforme, (c) populosa e (d) corte mediano.

5.2 Segmentação

Segmentação na visualização de dados sísmicos é o processo de redução que visa salientar regiões de interesse específico do volume. Ela pode significar tanto a eliminação de informações pouco interessantes do volume de dados, através da atribuição de opacidades nulas (caso que equivale à etapa de classificação da visualização volumétrica direta), quanto a extração de um subconjunto limitado por superfícies associadas a eventos sísmicos significativos (*volume sculpting*).

5.2.1 Atribuição de opacidades

No primeiro caso, o intérprete faz uso do tedioso processo de desenho da função de transferência para tentar isolar os eventos de interesse. Entretanto, a simples atribuição de opacidades através de uma função de transferência é incapaz de isolar um evento sísmico único. Devido à natureza ondulatória dos dados, é possível separar apenas as regiões de valores extremos do volume de dados. Uma faixa de amplitudes baixas a intermediárias é comum a todos os eventos, o que impede sua individualização com base apenas na atribuição de opacidades. Além disso, a flutuação da amplitude máxima ao longo de um evento impede o seu uso como parâmetro de segmentação. Portanto, a segmentação de um evento único pode ser atingida apenas parcialmente, o que representa uma das maiores limitações da visualização volumétrica direta de dados sísmicos. Uma consequência dessa limitação é a oclusão de regiões de interesse dentro do volume por outras informações que são de difícil discriminação com base apenas em classificação e tonalização, ou seja, por regiões desconexas que compartilham as mesmas classes do histograma de distribuição de dados. Desta forma, a visualização de grandes volumes fornece geralmente poucas informações devido à confusão gerada pela superposição de diferentes eventos sísmicos na imagem final, limitando seu uso prático, conforme demonstrado na Figura 5.8.

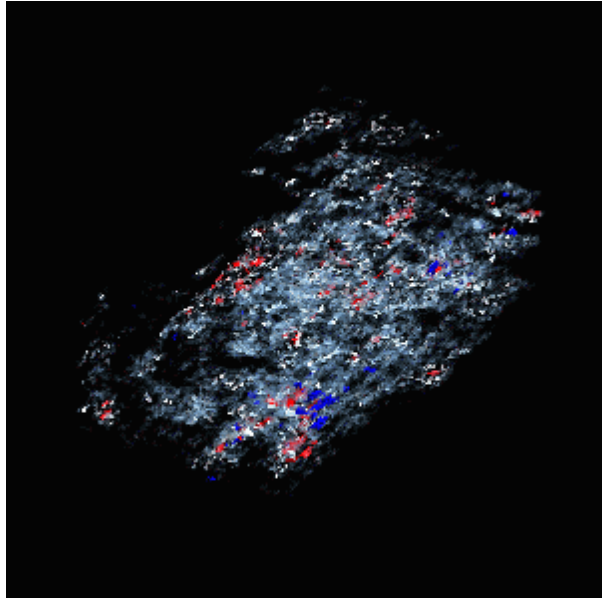
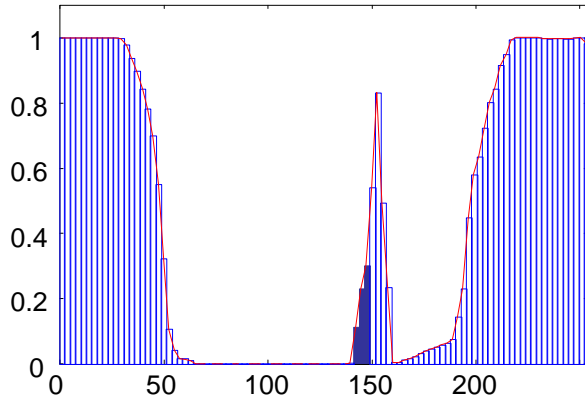
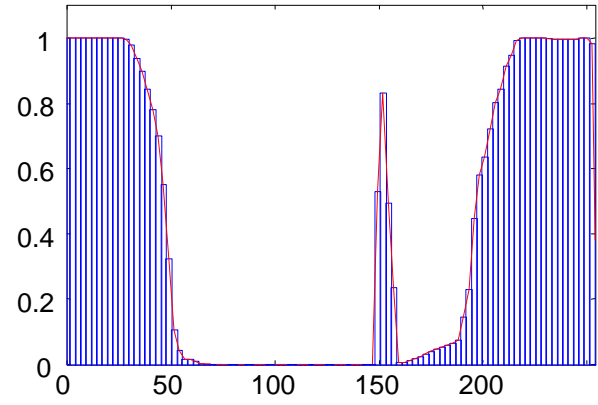


Figura 5.8 - Imagem confusa resultante da incapacidade de individualizar eventos sísmicos utilizando visualização volumétrica direta.

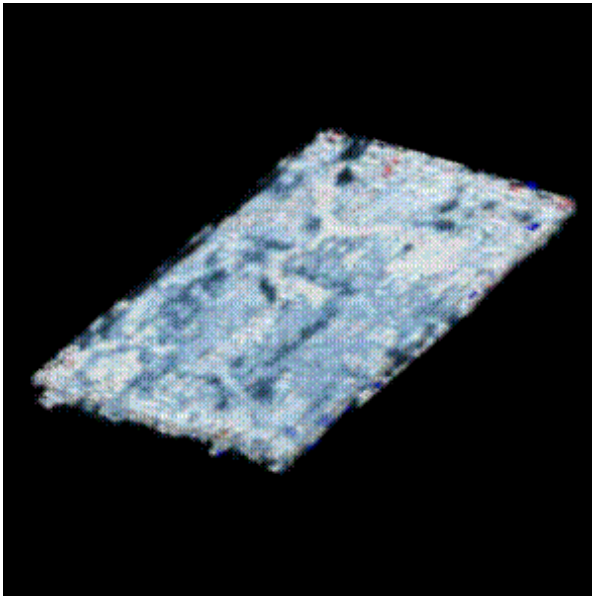
Por fim, as imagens produzidas por técnicas de visualização volumétrica direta são muito sensíveis à parametrização da função de transferência. Pequenas modificações podem resultar em grandes diferenças na imagem final. Este efeito é demonstrado na Figura 5.9, em que uma pequena alteração na função de transferência modifica radicalmente a imagem obtida. A falta de critérios geofísicos de segmentação com base na opacidade, à semelhança do que ocorre com dados de ultra-sonografia, possibilita ao intérprete uma liberdade no desenho da função de transferência. Dessa forma, não é possível garantir a fidelidade das imagens geradas. A avaliação da qualidade do resultado obtido é baseada apenas em critérios subjetivos. Técnicas de avaliação de fidelidade de imagens médicas, como o mapa de reflexão (Tiede *et al.*, 1990), são de uso limitado em sísmica dado o desconhecimento do modelo geológico implícito.



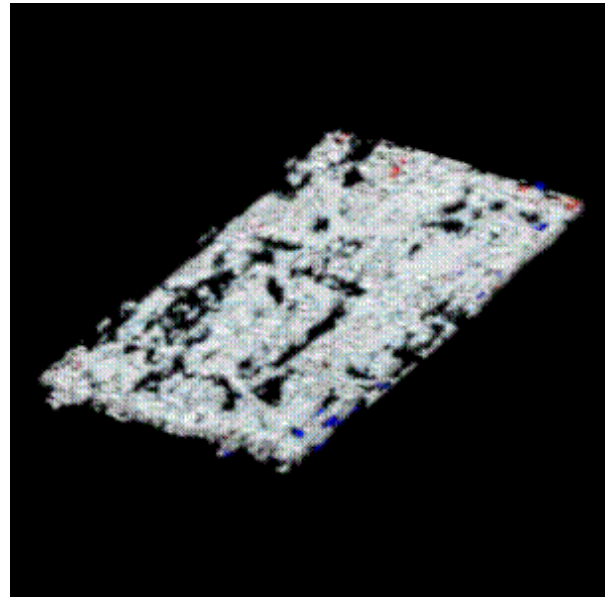
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9 - Sensibilidade da imagem final à parametrização da função de transferência. Imagem (c) gerada a partir da função (a); imagem (d) gerada a partir da função (b). As duas funções diferem entre si apenas pelas três classes preenchidas em (a).

5.2.2 Extração de superfícies

A segunda forma de segmentação está intimamente ligada à interpretação e extração de superfícies. A interpretação de dados sísmicos está fundamentada essencialmente nas operações de *picking* e *tracking*.

Picking é o processo de determinar as coordenadas espaciais da ocorrência de um determinado evento sísmico dentro do volume de dados, o que é geralmente indicado por um máximo local de amplitude. Algumas características dos dados sísmicos discutidas no Capítulo 2, com destaque para o elevado conteúdo de ruídos e mudanças na forma do pulso no decorrer de sua propagação, podem degenerar esse máximo e tornar o processo extremamente difícil. Estas dificuldades são conhecidas e discutidas desde os tempos da aquisição analógica de dados (Dyk & Eisler, 1951). Com o advento da aquisição 3D e o aumento do tamanho dos levantamentos, foram buscados métodos automáticos de *picking* devido ao grande volume de informações adquirido (Paulson & Merdler, 1968). Desde então, uma infinidade de técnicas estatísticas e determinísticas têm sido desenvolvidas e usadas como critérios de decisão, variando desde simples somas ao longo de padrões coerentes até redes neuronais.

A operação de *Tracking* consiste em efetuar o *picking* de um evento sísmico ao longo de todo o volume de dados seguindo alguma coerência espacial, geralmente de forma semi-automática. O intérprete necessita verificar os resultados e eventualmente interferir, já que os algoritmos de *autotracking* também têm dificuldades com descontinuidades (falhas), ruídos e onde há mudança na forma da onda (Sheriff, 1991). *Tracking* é essencialmente uma operação de segmentação. O intérprete visa construir um modelo geológico que sintetize toda a informação estrutural contida no volume sísmico utilizando apenas um conjunto limitado de superfícies. Essa é a proposta fundamental da sísmica de reflexão, que, ao medir a derivada da impedância acústica ao longo do volume de dados, tenta localizar as interfaces geológicas e obter uma representação baseada em superfícies.

A segmentação do volume sísmico através de *picking* e *tracking* está tipicamente associada a uma interpretação estrutural. Já a interpretação estratigráfica visa, dentre outros objetivos, obter uma predição da litologia e do ambiente de sedimentação com base nos padrões de reflexão (Sheriff, 1991), executando essencialmente uma análise da textura sísmica entre as interfaces dominantes. As feições estratigráficas são freqüentemente difíceis de serem

visualizadas devido ao seu padrão caótico típico. As técnicas comuns baseiam-se na iluminação de texturas em imagens de seções escolhidas pelo intérprete (Figura 5.10). A incorporação desta informação na visualização volumétrica, seja esta direta ou por extração de superfícies, é um campo de pesquisa ainda pouco explorado. Os classificadores de Levoy (1988) e Sakas & Walter (1995), que visam salientar superfícies em visualização volumétrica direta ao mesmo tempo que representam a informação volumétrica interior, necessitam de mais testes para comprovar sua eficácia quando aplicados a dados sísmicos desta natureza.

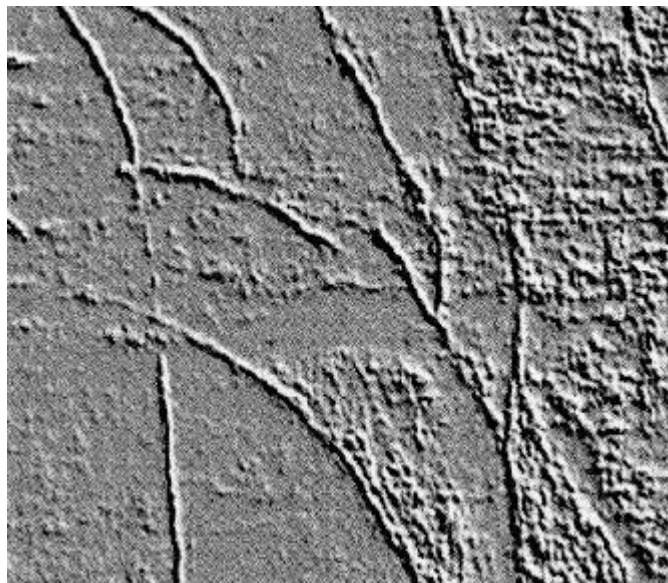


Figura 5.10 - Exemplo de feição sísmica estratigráfica de difícil tratamento utilizando a técnica de visualização volumétrica direta. A imagem está iluminada a partir do canto superior direito, ressaltando uma textura rugosa associada a lentes arenosas (Caldwell *et al.*, 1997).

Assumindo que a informação de interesse esteja limitada apenas às interfaces, a abordagem mais direta para a segmentação seria a extração de iso-superfícies utilizando algum algoritmo do tipo *surface rendering*. Neste caso, a segmentação se confunde com o próprio *rendering*. Entretanto, diversos efeitos indesejáveis associados ao fenômeno de propagação de ondas elásticas, somados às limitações da técnica de aquisição e processamento de dados, impedem que esse objetivo seja atingido com sucesso. A Figura 5.11 mostra uma imagem obtida com a aplicação do algoritmo *marching cubes* sobre os dados de estudo. A qualidade da informação

apresentada é nitidamente inferior à obtida com visualização volumétrica direta, (e.g., Figura 5.9(c)), sendo difícil identificar a feição de interesse. A limitação mais evidente é o não mapeamento da variação de amplitude, o que não permite a identificação de máximos.

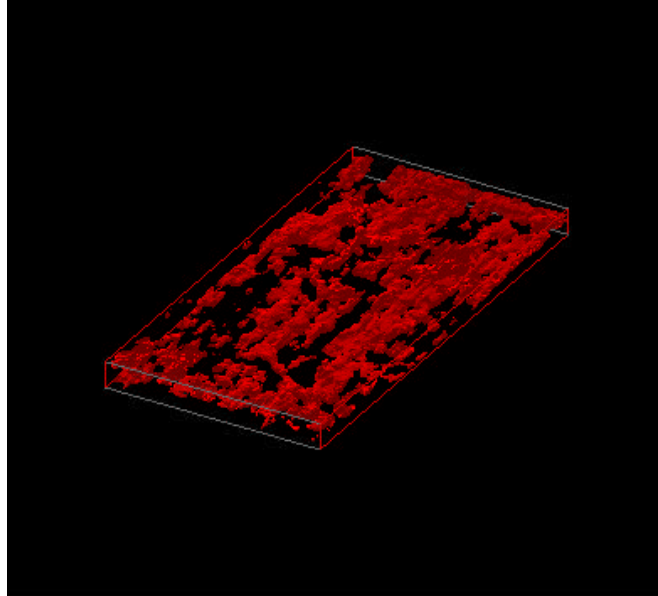


Figura 5.11 – Imagem obtida com o algoritmo *marching cubes*.

A Seção 3.4 lista diversas características dos dados de ultra-sonografia que levam os métodos de extração de superfícies a falhar completamente na detecção/segmentação de interfaces. Por analogia, essas características também se aplicam a dados sísmicos. Pelo exposto no Capítulo 2, existem vários pontos importantes para a segmentação nos quais os dados sísmicos apresentam uma complexidade ainda maior que os de ultra-sonografia 3D, dentre eles:

1. presença de ruídos coerentes que não representam interfaces nas posições onde aparecem;
2. reverberações (múltiplas), potencialmente maiores que as encontradas em ultra-sonografia, podem interferir nas reflexões primárias e também não representam interfaces onde ocorrem;

3. anomalias de amplitude podem ser registradas ao longo dos refletores, efeito que é de interesse, devendo ser representado corretamente, o que é inviável utilizando métodos de extração de iso-superfícies;
4. o pulso sísmico que efetivamente se propaga na subsuperfície é de frequência muito mais baixa, resultando em interfaces representadas por longas oscilações pouco localizáveis.

A Figura 5.12 mostra algumas destas características em uma seção sísmica interpretada. A inspeção das amplitudes ao longo dos horizontes interpretados evidencia o maior obstáculo à aplicação de técnicas de extração de superfícies: o fato dos eventos sísmicos não serem objetos definidos por um único valor de corte. Os algoritmos de extração de superfícies são incapazes de reproduzir as interpretações apresentadas.

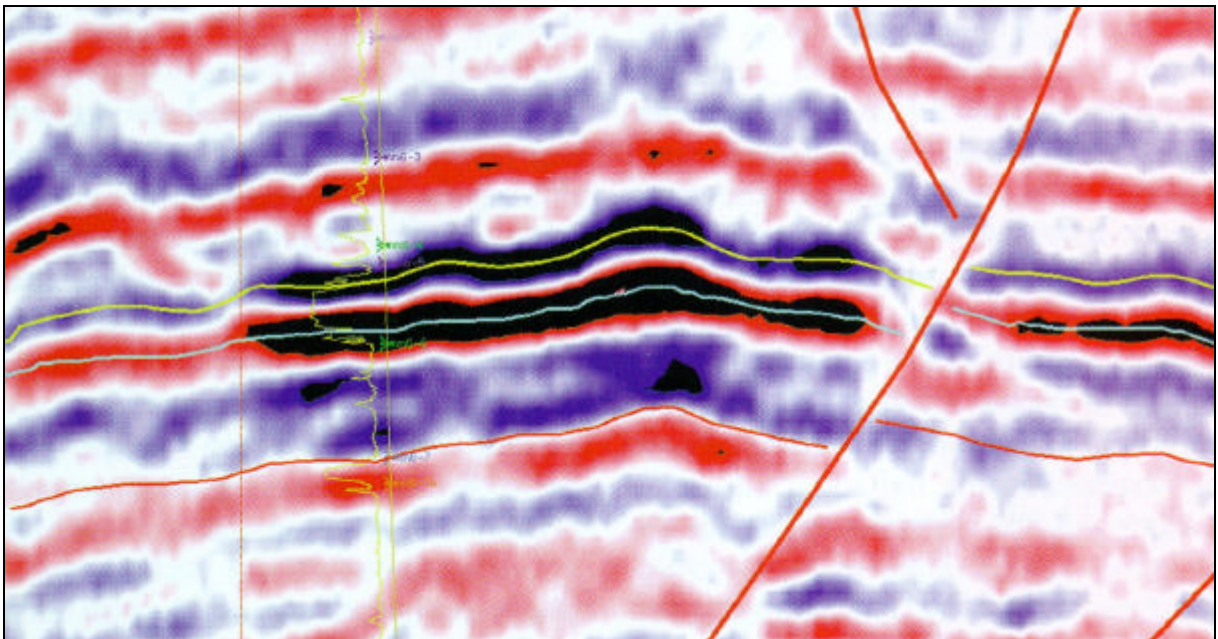


Figura 5.12 - Seção sísmica com anomalias de amplitude (regiões escuras) (Caldwell *et al.*, 1997). Note-se que os horizontes interpretados (linhas amarela, ciano e vermelha mais espessas) não são definidos por um valor único de amplitude.

5.3 Estimativa dos vetores normais

Conforme visto no Capítulo 4, a tonalização baseada na orientação das superfícies aumenta de forma significativa a qualidade da informação visualizada. Entretanto, a estimativa dos vetores normais é sensível à interferência dos ruídos. Sakas & Walter (1995) propõem alternativas multi-escala e diversos filtros para tratar este problema em dados de ultrasonografia. Contudo, nenhuma consideração é feita sobre outro efeito presente nesses dados e de forma ainda mais marcante em sísmica: o modo como a amplitude depende do ângulo de incidência e sua variação ao longo dos eventos. Outro ponto igualmente importante é a natureza ondulatória dos eventos sísmicos, o que gera efeitos indesejáveis de tonalização. Ambos são discutidos em maior detalhe nesta Seção.

5.3.1 Efeito da variação de amplitude

A estimativa dos vetores normais diretamente a partir dos valores de amplitude do volume de dados fornece uma informação relacionada unicamente com a variação local deste atributo ao longo dos eventos sísmicos. Os vetores normais obtidos não retratam a geometria dos eventos e sim o relevo associado às flutuações de amplitude ao longo deles. As causas destas variações foram discutidas no Capítulo 2 e se devem principalmente aos ruídos, à variação do ângulo de incidência do pulso sísmico nas interfaces ou à presença de hidrocarbonetos. A Figura 5.13 ilustra este efeito em um conjunto sintético de dados, em que pode ser vista uma anomalia de amplitudes sobre um refletor plano. Apesar do vetor normal ao refletor ser vertical, o que se obtém é uma dispersão de vetores diretamente associada a um relevo ondulatório induzido pelas amplitudes anômalas. Ao utilizar estes vetores normais no modelo de iluminação, o que se obtém é uma tonalização incorreta dos eventos sísmicos. Faixas mais escuras podem se desenvolver ao longo dos eventos sem qualquer relação com variações nas suas geometrias. Nessa situação, o correto seria mapear as variações de amplitudes apenas por mudanças de cor, mantendo a iluminação constante para todo o evento com base apenas na sua atitude regional.

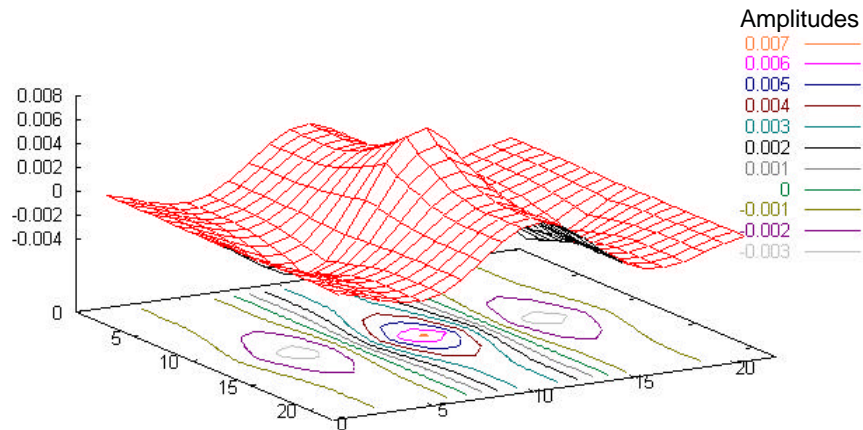


Figura 5.13 - Relevo (superfície representada pela malha vermelha) definido pelo mapeamento das amplitudes sísmicas sobre uma interface plana horizontal.

5.3.2 Efeito da natureza ondulatória dos dados

Conforme discutido no Capítulo 2, a forma ondulatória associada aos eventos sísmicos é consequência do uso de um pulso de conteúdo limitado de frequências e de limitações no processo de deconvolução. Não fossem estes fatores, seria obtida uma função delta de Dirac correspondente à posição da interface entre dois meios. A utilização dos valores de amplitude para estimar o gradiente, e a partir deste os vetores normais, resulta em uma dispersão de valores que segue o mesmo caráter ondulatório. Como consequência, na posição de máxima amplitude local do evento o vetor normal aponta em direção paralela à interface a que está associado, levando a uma tonalização errônea que atenua justamente a informação que se deseja realçar. Este efeito é ilustrado na Figura 5.14.

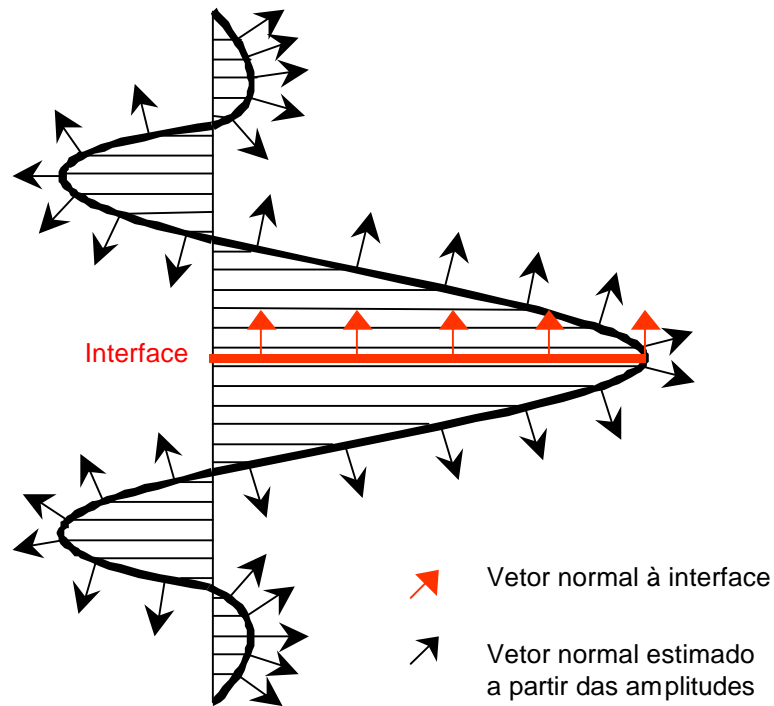


Figura 5.14 - Diferença entre os vetores normais estimados diretamente a partir das amplitudes sísmicas e o vetor normal verdadeiro de um horizonte sísmico.

Portanto, a estimativa dos vetores normais diretamente a partir dos valores de amplitude representa uma alternativa pouco adequada. Uma abordagem mais correta seria a segmentação de todos os eventos na forma de superfícies poligonais, o que reduz a tonalização a um problema mais simples. As amplitudes poderiam então ser mapeadas como textura sobre os polígonos e iluminadas, de forma semelhante à técnica de *texture-mapping* descrita no Capítulo 4. O mapeamento de amplitude como textura é indicado por Dorn *et al.* (1995) como a técnica mais apropriada para representar as variações de amplitude ao longo dos eventos sísmicos já segmentados. Entretanto, conforme discutido na Seção 5.2, ainda não existem técnicas robustas de extração de superfícies em dados sísmicos.

5.4 Resumo do capítulo

O sucesso da visualização volumétrica está fundamentado em requisitos específicos vinculados à natureza e às características dos dados. Em sísmica, alguns destes requisitos, discutidos neste capítulo, são:

1. controle da representação digital – os algoritmos devem ser capazes de manipular diferentes tipos de dados: *bytes*, números inteiros e ponto-flutuante;
2. segmentação interativa – os sistemas devem ser capazes de permitir ao intérprete extrair subvolumes seguindo alguma coerência espacial definida interativamente;
3. funções de transferência em multi-escala – os sistemas devem ser capazes de permitir ao intérprete projetar funções detalhadas e com refinamento em regiões de maior interesse;
4. estimativa adequada dos vetores normais – os algoritmos devem ser capazes de aplicar um modelo de iluminação apropriado à natureza ondulatória dos dados.

Além destes requisitos específicos para dados sísmicos, outros mais gerais de visualização também se aplicam. Em especial deve-se destacar o *feedback* interativo - mudanças na função de transferência e nos parâmetros de iluminação devem ter efeito imediato. A importância deste requisito está na inexistência de uma solução automática para os problemas analisados, o que implica em um processo de tentativa e erro que é ainda dificultado face ao pequeno conhecimento *a priori* dos materiais presentes em subsuperfície.

6 Conclusões e Sugestões

Diversas técnicas de visualização volumétrica têm sido aplicadas com sucesso a dados médicos. Este sucesso é devido à sua capacidade de representar informações que são difíceis de obter com imagens bidimensionais. A alta qualidade das imagens obtidas, principalmente pelos métodos de CT e MRI, têm motivado o desenvolvimento de técnicas sofisticadas de visualização volumétrica. As técnicas de visualização volumétrica direta têm se mostrado superiores às baseadas em extração de superfícies para diversas aplicações que envolvem a visualização de estruturas internas pouco definidas.

A introdução da sísmica tridimensional abriu novas fronteiras para a exploração de hidrocarbonetos e possibilitou uma interpretação de dados muito mais precisa. Entretanto, diversas limitações fundamentais do método fazem dos dados sísmicos um dos mais complexos desafios para a visualização volumétrica.

Em sísmica, a informação de interesse está limitada em sua maior parte às interfaces entre meios de diferentes densidades e velocidades de propagação de ondas elásticas, uma vez que os dados representam essencialmente a derivada do campo de impedâncias acústicas. A informação textural contida entre as interfaces não é adequadamente tratada pelos métodos de visualização volumétrica de que se tem conhecimento no momento. Dessa forma, a abordagem mais evidente de visualização, o método de *surface rendering*, contemplaria quase a totalidade da informação, ao contrário do que ocorre em medicina. Entretanto, esse método falha por diversas razões discutidas ao longo deste trabalho, sendo as principais o fato de um evento sísmico não ser definido por um valor único de amplitude e o conteúdo geralmente elevado de ruídos.

O método de visualização volumétrica direta também tem sido utilizado para visualizar superfícies semitransparentes ou mesmo opacas (Levoy, 1988). Os algoritmos dessa classe dependem de uma classificação inicial dos dados originais em diferentes materiais. Em CT e MRI isto é feito com base em um conhecimento preliminar das respostas dos diferentes tecidos aos métodos de investigação. A inexistência de uma classificação confiável tem levado a resultados pouco animadores para a visualização de dados de ultra-sonografia. Já em

sísmica, o conhecimento *a priori* das litologias presentes é em geral muito pequeno. O modelo geológico é arbitrário, dependendo apenas da concepção que o intérprete faz a partir do seu entendimento dos dados. Além disso, a variação de propriedades físicas dentro de cada litologia pode ser grande, tornando impossível uma classificação dos materiais à semelhança do que é feito em medicina. Isto torna a classificação, além de muito mais difícil, apenas um artifício para realçar determinadas regiões no volume de dados.

A flexibilidade propiciada por uma classificação arbitrária pode levar a uma variedade de impressões visuais para o mesmo conjunto de dados. Os dados sísmicos são particularmente sensíveis à mudanças na função de transferência. Isto torna difícil estimar quais parâmetros são os mais apropriados e qual a precisão com que a imagem resultante representa os eventos sísmicos. Métodos que não dependem de uma classificação inicial (*e.g.*, Sabella, 1988) em geral resultam em imagens de aplicação prática limitada.

Em termos de quantização, nenhuma diferença significativa foi encontrada no nível visual entre os algoritmos uniforme e de corte mediano para o conjunto de dados estudados. O algoritmo de populosoidade mostrou resultados insatisfatórios que não recomendam a sua utilização. Os resultados apontam para a adoção generalizada da quantização uniforme por ser de fácil entendimento e de implementação simples. O uso de funções de transferência contínuas é uma alternativa interessante a ser explorada quando as limitações de *hardware* permitirem um processamento baseado integralmente em dados em representação de ponto-flutuante.

Uma das maiores limitações da técnica de visualização volumétrica direta aplicada a dados sísmicos é a sua incapacidade de individualizar completamente um evento sísmico. Os eventos sísmicos compartilham uma faixa de valores comuns que não pode ser desprezada sem comprometer a sua continuidade na imagem, resultando na oclusão do evento de interesse por outros de difícil discriminação com base apenas em classificação. A visualização de grandes volumes sísmicos gera imagens confusas e de aplicação limitada devido à superposição de diferentes eventos. Tudo isso limita a aplicação destas técnicas à visualização de máximos extremos de amplitude presentes no volume.

O método de visualização volumétrica direta utiliza o gradiente para realçar e tonalizar superfícies presentes dentro do volume de dados. Entretanto, a iluminação obtida pela

estimativa dos vetores normais diretamente a partir dos valores de amplitudes é totalmente inadequada. Além de suscetível ao ruído, este método leva à iluminação do relevo resultante do mapeamento das amplitudes sobre os eventos ao invés da geometria do próprio evento. Acima de tudo, a natureza ondulatória do pulso sísmico produz uma tonalização incorreta, visto que as amplitudes mais representativas de uma interface sísmica são justamente as mais atenuadas.

O sucesso da visualização volumétrica de dados sísmicos depende de uma série de requisitos. Neste trabalho foram identificados como de importância fundamental: controle da representação digital, segmentação interativa, funções de transferência em multi-escala e estimativa adequada dos vetores normais.

Por fim, o sucesso do método de *surface rendering* em visualização volumétrica de dados sísmicos depende essencialmente da robustez dos algoritmos empregados, enquanto as representações semitransparentes do método de visualização volumétrica direta necessitam de esquemas mais sofisticados de classificação e iluminação. Tudo isto demonstra que ainda são necessários mais estudos para tornar a visualização volumétrica algo mais do que uma ferramenta de investigação preliminar de máximos de amplitude presentes em dados sísmicos tridimensionais.

6.1 Proposta de trabalhos futuros

Uma proposta para um trabalho futuro consiste em desenvolver uma abordagem que integre o *picking* de horizontes com a visualização volumétrica. Para tanto, poderiam ser usados métodos semi-automáticos ou totalmente automáticos. A idéia fundamental é pesquisar um método robusto de segmentação que permita a extração dos eventos sísmicos como superfícies descritas por primitivas geométricas poligonais, o que reduz a estimativa dos vetores normais a um problema simples. As amplitudes poderiam então ser mapeadas como textura sobre os polígonos e iluminadas corretamente.

Uma alternativa a ser investigada inclui os métodos de segmentação baseados em análise espaço-escala. Eles são úteis na atenuação de ruídos e na detecção de singularidades. Entre as técnicas desta classe com grande potencial estão a difusão não-linear anisotrópica (Steen &

Olstad, 1994) ou a análise multi-escala no domínio da transformada *wavelet* (Westermann & Ertl, 1997). Esta última combina ainda a conveniência da compressão de dados, um ponto de máxima importância quando se trata de dados sísmicos tridimensionais.

Referências e bibliografia

- M. Bantum. *Interactive Visualization of Volume Data*, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1996.
- J. Blinn. Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, *Computer Graphics* **11**(2): 192-198, 1977.
- J. Blinn. Light Reflection Functions for Simulation of Clouds and Dusty Surfaces, *Computer Graphics* **16**(3): 21-29, 1982.
- J. Caldwell, A. Chowdhury, P. van Bommel, F. Engelmark, L. Sonneland, N. Neidell. Exploring for Stratigraphic Traps, *Oilfield Review* **9**(4): 48-61, 1997.
- J. Carr. *Surface Reconstruction in 3D Medical Imaging*, Ph.D. Thesis, University of Canterbury, NZ, 1996.
- H.E. Cline, W.E. Lorensen, S. Ludke, C.R. Crawford & B.C Teeter. Two Algorithms for the Three-Dimensional Construction of Tomograms, *Medical Physics* **15**(3): 320-327, 1988.
- G.A. Dorn, M.J. Cole & K.M. Tubman. Visualization in 3-D Seismic Interpretation, *The Leading Edge* **14**(10): 1045-1049, 1995.
- M. Doyle. Quantization Effects in Digital Signals. *53rd Annual International Meeting, Society Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts*, pp. 510-513, 1983.
- R.A. Drebin, L. Carpenter & P. Hanrahan. Volume Rendering, *Computer Graphics* **22**(4): 65-74, 1988.
- K. Dyk & J.D. Eisler. A Study of the Influence of Background Noise on Reflection Picking, *Geophysics* **16**(3): 450-455, 1951.

- A.I. El-Fallah, G.E. Ford, V.R. Algazi & R.R. Estes Jr. The Invariance of Edges and Corners Under Mean Curvature Diffusions of Images, *Proc. SPIE Image and Video Processing III*, 1995.
- H. Fuchs, Z.M. Kedam & S.P. Uselton. Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours, *Communications of the ACM*, **20**(10): 693-702, 1977.
- H. Gouraud. Continuous Shading of Curved Surfaces, *IEEE Transactions of Computers* **20**(6): 623-629, 1971.
- M.H. Gross, R. Koch, L. Lippert & A. Dreger. A New Method to Approximate the Volume Rendering Equation Using Wavelet Bases and Piecewise Polynomials, *Computers & Graphics* **19**(1): 47-62, 1995.
- G.T. Herman & H.K. Liu. Three-Dimensional Display of Human Organs from Computed Tomograms, *Computer Graphics and Image Processing* **9**(1): 1-21, 1979.
- K.H. Hoehne, M. Bomans, A. Pommert, M. Riemer, C. Schiers, U. Tiede & G. Wiebecke. 3D Visualization of Tomographic Volume Data Using the Generalized Voxel Model, *The Visual Computer* **6**(1): 28-36, 1990.
- N. Jackie, T. Davis & M. Woo. *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL*, Addison-Wesley, 1993.
- A. Kaufman. Memory and Processing Architecture for 3D Voxel-based Imagery, *IEEE Computer Graphics and Applications* **8**(6): 33-40, 1988.
- A. Kaufman. *Volume Visualization: Principles and Advances, SIGGRAPH '97 Lecture Notes, Courses 31/32*, 1997.
- P. Lacroute & M. Levoy. Fast Volume Rendering using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation, *Computer Graphics* **28**(3): 451-458, 1995.
- P. Lacroute. *Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation*, Ph.D. Thesis, Stanford University, CA, 1995.

- D. Laur & P. Hanrahan. Hierarchical Splatting: A Progressive Refinement Algorithm for Volume Rendering, *Computer Graphics* **25**(4): 285-288, 1991.
- M. Levoy. Display of Surfaces from Volume Data, *IEEE Computer Graphics and Applications* **5**(3): 29-37, 1988.
- M. Levoy. Viewing Algorithms. In: Kaufman, A., editor, *Volume Visualization*, IEEE Computer Society Press Tutorial, Los Alamitos, CA, pp. 89-92, 1991.
- M. Levoy. Volume Rendering Using the Fourier-Projection Slice Theorem, *Graphics Interface '92* pp. 61-69, 1992.
- W.E. Lorensen & H.E. Cline. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Computer Graphics* **21**(4): 163-169, 1987.
- Y. Luo & G.T. Schuster. Wave Packet Transform and Data Compression, *62nd Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts*, pp. 1187-1190, 1992.
- T. Malzbender. Fourier Volume Rendering, *ACM Transactions of Graphics* **12**(3): 233-250, 1993.
- T. McReynolds, D. Blythe, C. Fowle, B. Grantham, S. Hui & P. Womack. *Programming with OpenGL: Advanced Rendering. SIGGRAPH '97 Lecture Notes, Course 11*, pp. 144-153, 1997.
- S. Muraki. Volume Data and Wavelet Transform, *IEEE Computer Graphics and Applications* **13**(4): 50-56, 1993.
- K.V. Paulson & S.C. Merdler. Automatic Seismic Reflection Picking, *Geophysics* **33**(3): 431-440, 1968.
- H. Pfister. *Architectures for Real-Time Volume Rendering*, Ph.D. Thesis, University of New York at Stony Brook, NY, 1996.
- B.T. Phong. Illumination for Computer Generated Pictures, *Communications of the ACM* **18**(6): 311-317, 1975.

- T. Porter & T. Duff. Compositing Digital Images, *Computer Graphics* **18**(3): 253-260, 1984.
- P. Sabella. A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields, *Computer Graphics* **22**(4): 51-57, 1988.
- G. Sakas & S. Walter. Extracting Surfaces from Fuzzy 3D-Ultrasound Data, *Computer Graphics* **29**(4) pp. 465-474, 1995.
- G. Sakas, L. Schreyer & M. Grimm. Case Study: Pre-Processing, Segmenting and Volume Rendering 3D Ultrasonic Data, *IEEE Computer Graphics and Applications* **15**(4): 47-54, 1995.
- K. Sayood. *Introduction to Data Compression*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 1996.
- R.B. Seixas. *Visualização Volumétrica com Ray-Casting num Ambiente Distribuído*, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- R.E. Sheriff. *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 1991.
- P. Shirley & A. Tuchman. A Polygonal Approximation to Direct Scalar Volume Rendering, *Computer Graphics* **24**(5): 63-70, 1990.
- E.N. Steen & B. Olstad. Scale-space and Boundary Detection in Ultrasonic Imaging Using Nonlinear Signal-adaptive Anisotropic Diffusion, *Proc. SPIE Medical Imaging*, 1994.
- U. Tiede, K.H. Hoehne, M. Bomans, A. Pommert, M. Riemer & G. Wiebcke. Investigation of Medical 3D-Rendering Algorithms, *IEEE Computer Graphics and Applications* **10**(2): 41-52, 1990.
- C. Upson & M. Keeler. V-BUFFER: Visible Volume Rendering, *Computer Graphics* **22**(4): 59-64, 1988.

- R. Westermann & T. Ertl. A Multiscale Approach to Integrated Volume Segmentation and Rendering, *Computer Graphics Forum (Proc. EUROGRAPHICS '97)* **16**(3): 117-129, 1997
- R. Westermann. *A Multiresolution Framework for Volume Rendering*, Ph.D. Thesis, Universität Dortmund, Shaker Verlag Aachen, 1997.
- L. Westover. Footprint Evaluation for Volume Rendering, *Computer Graphics* **24**(4): 367-376, 1990.
- O. Wilson, A. Van Gelder & J. Wilhelms. *Direct Volume Rendering via 3D Textures*, UCSC Technical Report UCSC-CRL-94-19, 1994.
- C.M. Wittenbrink. *Designing Optimal Parallel Volume Rendering Algorithms*, Ph.D. Thesis, University of Washington, WA, 1993.
- R.H. Wolfe & C.N. Liu. Interactive Visualization of 3D Seismic Data: A Volumetric Method, *IEEE Computer Graphics and Applications* **8**(7): 24-30, 1988.
- B. Yeo & B. Liu. Volume Rendering of DCT-Based Compressed 3D Scalar Data, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **1**(1): 29-43, 1995.
- O. Yilmaz. *Seismic Data Processing*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 1987.
- S.W. Zucker & R.A. Hummel. A Three-Dimensional Edge Operator, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **3**(3): 324-331, 1981.

Obras Consultadas

- J. Gomes & L. Velho. *Image Processing for Computer Graphics*, Springer-Verlag, New York, NY, 1997.
- P. Heckbert. Color Image Quantization for Frame Buffer Display, *Computer Graphics* **16**(3): 297-304, 1982.
- A. Jain. *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
- A. Watt & M. Watt. *Advanced Animation and Rendering Techniques*, ACM Press, New York, NY, 1992.

Aspectos da visualização volumétrica de dados sísmicos

Dissertação de Mestrado apresentada por ANDRÉ LUÍS BARRETO GERHARDT em 01 de setembro de 1998 ao Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e aprovada pela comissão julgadora formada por:

Prof. Marcelo Gattass (DI/PUC-Rio)

Orientador

Prof. Luiz Fernando Martha (DEC/PUC-Rio)

Co-orientador

Prof. Celso Romanel (DEC/PUC-Rio)

Prof. Paulo Cezar Pinto de Carvalho (IMPA)

Jurandy Schmidt (Petróleo Brasileiro S.A.)

Visto e permitida a impressão.

Rio de Janeiro,

Coordenador dos Programas de Pós-
Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC-Rio