

### 3

## Representação e visualização de dados sísmicos

O estudo das características do dado a ser visualizado permite que sejam aplicadas técnicas de computação gráfica mais adequadas às suas particularidades. A natureza do dado sísmico e aspectos relacionados à sua visualização serão explorados nessa seção. Apesar de o domínio sísmico ser o foco do trabalho, as discussões e resultados obtidos nessa dissertação são válidos para visualização volumétrica em geral.

Na próxima seção será abordado o processo de obtenção e representação de dados sísmicos tridimensionais, também conhecidos como volumes sísmicos. A visualização desses volumes será discutida na Seção 3.2. Na Seção 3.3, Será apresentado o modelo de iluminação por oclusão direcional, abordando a equação de transporte da radiação que descreve como se dá a interação da luz com o volume.

### 3.1

#### Dados sísmicos tridimensionais

A exploração de hidrocarbonetos, tais quais petróleo e gás natural, pode ser realizada através da reflexão de uma onda sísmica. Esse processo, denominado de sísmica de reflexão, se divide em três etapas: aquisição, processamento e interpretação dos dados sísmicos.

A primeira delas, aquisição do dado sísmico, consiste na utilização de uma fonte geradora de ondas sísmicas que são propagadas abaixo da superfície da terra e permitem a identificação de seus elementos constituintes. Em aquisições terrestres, pode-se utilizar como fonte geradora a detonação de dinamites, enquanto nas aquisições marinhas as fontes normalmente utilizadas são canhões de ar pneumáticos.

Dessa forma, a onda sísmica produzida pela fonte se propaga pelo interior da terra, e ao encontrar uma interface entre duas camadas de rocha com valores de impedância acústica diferentes, parte da onda é refletida e a outra parte continua viajando na nova camada. A parte refletida da onda que retorna à superfície é captada nos receptores e gravada em sismógrafos.

Esse processo é realizado diversas vezes e sobre diferentes ângulos, sendo

resultante do levantamento sísmico um conjunto de pontos que possuem a posição da fonte no momento do disparo, a posição do receptor no instante em que a onda foi captada, o tempo de viagem da onda, desde a camada em que foi refletida até o receptor, bem como o valor da amplitude da onda recebida. Esse dado é conhecido como pré-empilhado e é enviado para ser processado.

Na etapa de processamento os dados são tratados de forma a se identificar e minimizar erros e ruídos inerentes ao levantamento sísmico. Para isso é realizado o empilhamento do dado. Este processo consiste na reorganização dos dados de forma a gerar uma grade regular tridimensional para a área de aquisição, onde cada elemento da grade (voxel) contém o valor da amplitude sísmica. Duas das dimensões desse dado são espaciais, representando as posições das fontes e dos receptores. Essas posições são transformadas de forma a representarem a mesma posição para uma mesma onda sísmica.

Além disso, a terceira dimensão do dado pode ser considerada temporal. Considerando a posição da fonte e do receptor a mesma na superfície, o tempo de cada amostra é dado pelo tempo que a onda leva até ser refletida mais o tempo de retornar a superfície. Uma coluna de amostras com as mesmas coordenadas espaciais, obtidas à uma determinada inclinação, variando apenas o tempo, é chamada de traço sísmico.

O empilhamento em sí é realizado para cada cela da grade. São identificados todos os traços sísmicos pertencentes a esta cela e é realizada uma média entre os traços com o objetivo de se reduzir o ruído. Ao fim do processamento, é gerado um dado sísmico pós-empilhado.

A Figura 3.1 mostra um volume sísmico com os valores de sua grade regular. São observadas duas dimensões espaciais, denominadas de inline (direção das linhas sísmicas) e crossline (direção perpendicular às linhas sísmicas), além da dimensão temporal. A cada ponto 3D (inline, crossline, tempo) está associado um valor de amplitude sísmica.

A última etapa consiste na interpretação do dado sísmico. Nessa etapa, em geral um geólogo ou geofísico analisa os dados obtidos a fim de criar um modelo que represente a geologia contida no levantamento sísmico. A visualização volumétrica dos dados pode facilitar e automatizar muitas das tarefas realizadas pelo intérprete, tais quais detecção de horizontes e falhas sísmicas.

## 3.2

### **Visualização volumétrica de dados sísmicos**

Visualização volumétrica é uma técnica bastante difundida em diversas áreas, seja para a visualização de dados médicos, sísmicos, engenharia, dentre

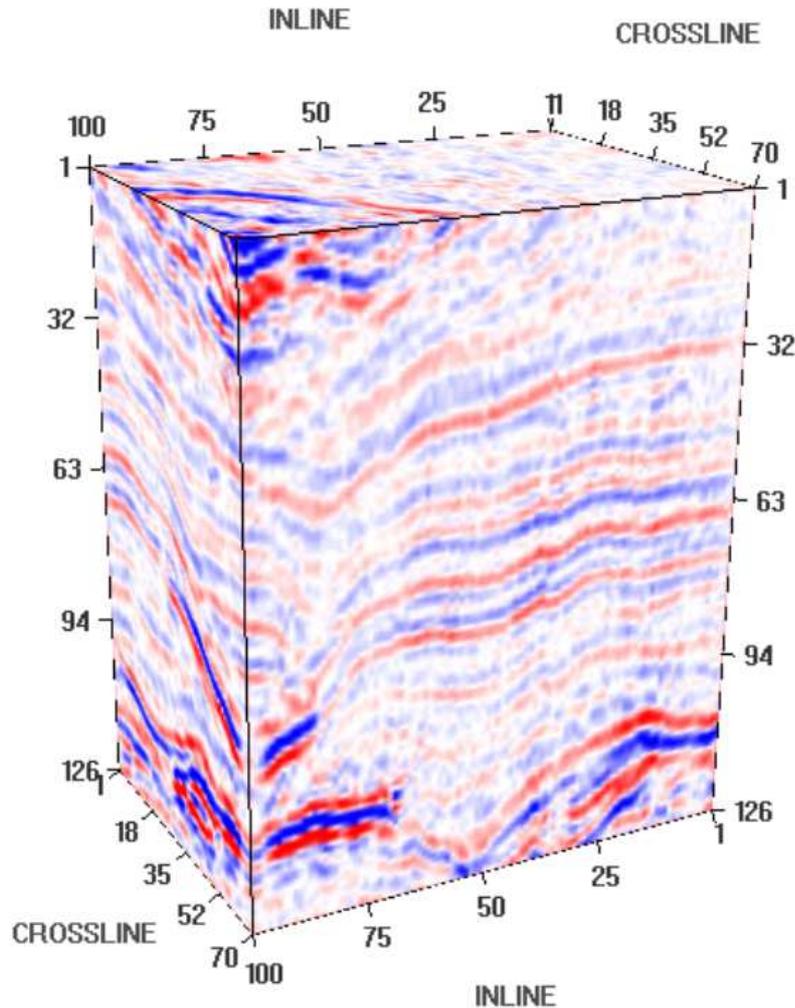


Figura 3.1: Volume sísmico com sua grade regular. Adaptada de [1].

outros. Sua estrutura volumétrica permite que sejam visualizadas as características internas do modelo interessantes ao domínio de estudo. Devido ao caráter volumétrico do dado, sua interação com a luz é complexa, sendo necessários modelos óticos para descrever os efeitos da luz sobre o dado 3D.

Nos dados volumétricos, a cada ponto 3D do volume está associado um valor escalar. O algoritmo de visualização volumétrica consiste em modelar a interação da luz com os elementos desse volume baseado no comportamento físico da luz. Diversos modelos [19] podem ser utilizados para simular o comportamento da luz interagindo com o meio. Um dos mais utilizados é o de emissão e absorção, em que as partículas emitem e absorvem a luz que chega até elas, não levando em conta a iluminação indireta nem os efeitos segundo espalhamento da luz.

A integral de visualização volumétrica [7], [9] descreve como se dá essa interação entre a luz e o volume. Ela simula como um raio de luz interage com a partícula através da integração das propriedades da luz (calculadas de

acordo com o valor escalar associado a partícula) durante a travessia do raio pelo volume.

Considerando-se apenas os efeitos de emissão e absorção, na integral de visualização volumétrica são integrados os coeficientes de absorção da luz e a cor emitida, que representa a energia radiante emitida ao longo do raio. Na próxima seção será abordada a equação de transporte da radiação [5], utilizada no modelo de iluminação por oclusão direcional proposto por Schott et al. Além dos efeitos de emissão e absorção, é realizada a simulação do efeito de espalhamento da luz interagindo com o dado.

Atributos físicos bastante utilizados em visualização volumétrica são a cor, para representar a energia emitida, e a opacidade, que representa o coeficiente de absorção do meio. Dessa forma, a manipulação dos valores da opacidade de determinados conjuntos de pontos que tenham os mesmos valores associados a eles torna possível que seja realizada a transparência de determinadas estruturas do dado, além do realce de outras áreas. Esse mapeamento dos valores escalares presentes no volume (cor e opacidade) pode ser denominado de classificação dos pontos e geralmente é realizado com o auxílio de funções de transferência [20].

As funções de transferência podem ser unidimensionais, onde para um dado valor escalar, existe um RGBA associado a ele, ou multidimensionais, utilizadas para refinar o processo de classificação dos elementos presentes no volume, utilizando uma combinação de valores interessante ao domínio sendo visualizado.

A organização espacial dos dados do volume pode ser de forma regular, onde para cada ponto de um grid regular igualmente espaçado, é associado um valor escalar a ele, sendo esse ponto denominado de voxel. Ou pode ser um dado irregular, onde os pontos estão distribuídos no espaço geralmente em malhas de tetraedros ou hexaedros.

A visualização volumétrica de dados irregulares foi abordada no recente trabalho de Miranda e Celes [21]. Devido a característica dos dados sísmicos de sempre possuírem uma grade regular associada, o escopo desse trabalho se restringe a visualização volumétrica de dados regulares. Dessa forma, pode-se armazenar o volume a ser visualizado em uma textura 3D, ou ainda em uma pilha de texturas 2D.

Ao se visualizar esse dado 3D, pode-se adotar uma abordagem indireta, onde é extraída uma superfície no dado, em pré-processamento, para depois renderizá-la, ou utilizar um método direto, o qual utiliza um modelo ótico para descrever como a luz é refletida, absorvida, emitida e espalhada ao atravessar o volume. Duas técnicas bastante difundidas nessa área são a visualização

volumétrica baseada em fatias e a baseada no algoritmo de traçado de raios.

### 3.2.1

#### Visualização volumétrica baseada em fatias

Essa técnica de visualização volumétrica direta tem a característica de renderizar fatias do dado, combinando-as de acordo com um modelo ótico, através da projeção de cada fatia gerada na tela em cada passo da avaliação da integral de visualização volumétrica. Ao final, tem-se o volume como um todo.

Essas fatias são geradas pela interseção do dado 3D com planos alinhados pelo eixo em que passa a direção do observador, como pode ser visto na figura 3.2. O número de fatias a serem utilizadas é um importante parâmetro a se levar em consideração na renderização volumétrica baseada em fatias. Dependendo do objetivo, podem ser utilizadas mais fatias para melhorar a visualização ou menos a fim de proporcionar um processamento mais eficiente. Pode-se utilizar o tamanho do voxel para se chegar a um bom espaçamento entre as fatias.

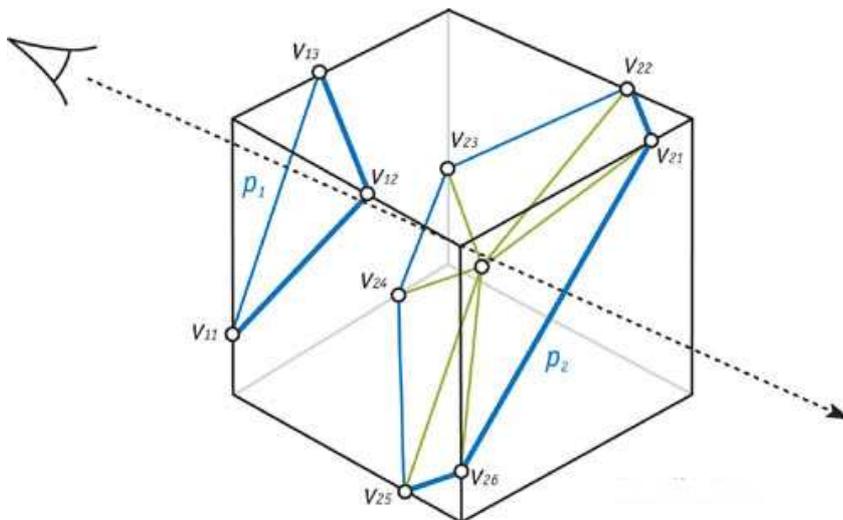


Figura 3.2: Fatias geradas na direção perpendicular ao eixo do observador. Adaptada de [2].

O grande vantagem dessa técnica em relação a visualização volumétrica baseada no traçado de raios é justamente a informação implícita da vizinhança de uma amostra que está sendo renderizada. Esta informação pode ser utilizada, por exemplo, para simular alguns modelos de iluminação global como a técnica de oclusão por ambiente.

### 3.2.2

#### Visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios

Na visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios, são lançados diversos raios da posição do observador, a fim de capturar a percepção que o mesmo tem da cena. Para cada pixel da tela é lançado um raio partindo da posição do olho, em direção ao centro do pixel, o raio então irá atravessar o volume, integrando as propriedades da luz pelas amostras do volume em sua trajetória, como pode ser visto na Figura 3.3. Para cada amostra na trajetória do raio é avaliado um modelo óptico que descreve a interação da luz com o meio, até deixar o volume e fornecer a informação da cor associada àquele pixel.

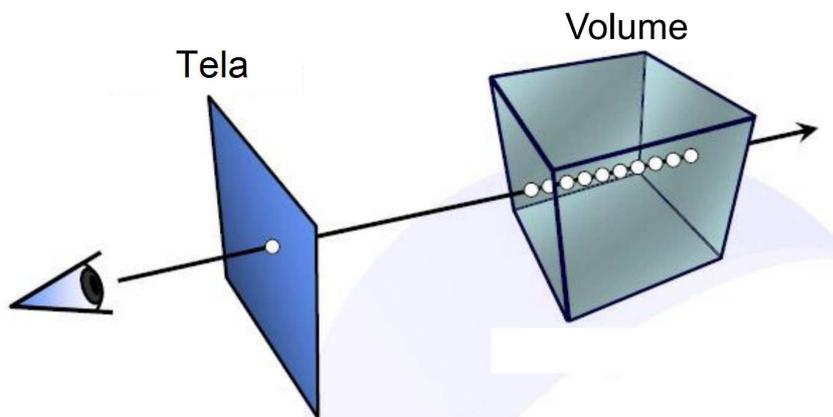


Figura 3.3: Raio correspondente a uma amostra na tela atravessando o volume. Amostras no raio uniformemente espaçadas. Adaptada de [3].

O modelo de emissão e absorção proposto por [7] é bastante utilizado em visualização volumétrica baseada no algoritmo de traçado de raios, são adicionados ainda outros efeitos à luz, de forma a proporcionar um maior realismo ao volume sendo visualizado. Devido à característica de ser lançado um raio para cada pixel da tela, essa técnica de visualização volumétrica é naturalmente paralelizável.

### 3.3

#### Modelo de iluminação por oclusão direcional

O modelo de iluminação por oclusão direcional proposto por Schott et al [4], simula aspectos da iluminação global como sombra e penumbra. Esse modelo assume que a luz é direcional, no sentido do observador ao modelo. A avaliação da quantidade de luz ambiente que chega a determinado ponto do volume considera apenas um cone de dispersão da luz em torno desse ponto, como pode ser visto na Figura 3.4. Dessa forma, é considerada a oclusão que os elementos do volume, na trajetória da luz ambiente, causam ao ponto a ser iluminado.

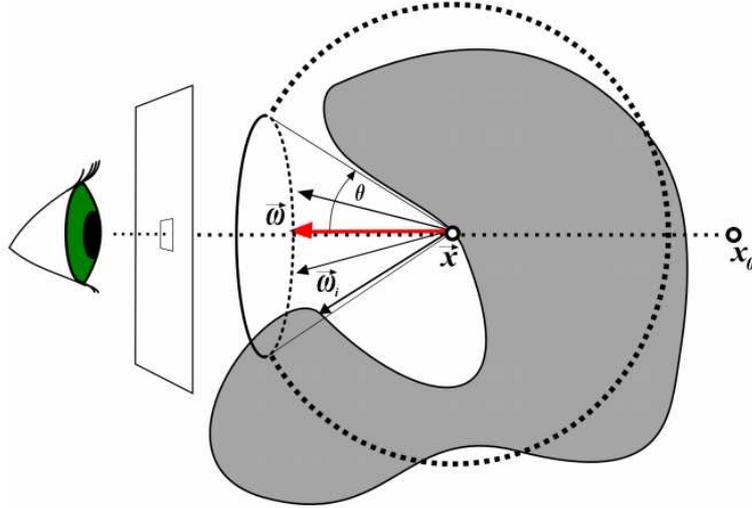


Figura 3.4: Radiação representada pelo círculo pontilhado, sendo dispersada apenas no cone de eixo alinhado com a direção da luz ( $\vec{w}$ ). Adaptada de [4].

A interação da luz com o volume é modelada de acordo com a equação de transporte da radiância [5]. Essa equação leva em conta os efeitos de absorção, emissão e dispersão da radiância no meio. A Figura 3.5 ilustra os efeitos simulados na equação de transporte da radiância.

A equação de transporte da radiância, abordada em [5], [22] e [23], é apresentada na Equação (3-1), que modela a radiância ao longo de um raio, sofrendo influência do meio por onde passa:

$$L(\vec{x}, \vec{w}) = T(\vec{x}, \vec{x}_0) L_b(\vec{x}_0, \vec{w}) + L_m(\vec{x}, \vec{w}) \quad (3-1)$$

onde  $\vec{x}$  é o ponto ao longo do raio em que chega a radiância,  $\vec{x}_0$  a origem do raio e  $\vec{w}$  a direção de propagação do raio. Essa equação representa a radiância que atinge determinado ponto, com  $T(\vec{x}, \vec{x}_0)$  sendo o fator de transparência que indica quando da radiância é preservada na passagem de  $\vec{x}$  até  $\vec{x}_0$ . A radiância segundo meio é dada por  $L_m(\vec{x}, \vec{w})$  e representa os efeitos de emissão, absorção e dispersão da radiância ao interagir com as partículas do meio, e a radiância segundo o *background*,  $L_b(\vec{x}_0, \vec{w})$ , representa a única fonte de energia radiante caso a luz atravessasse o meio sem sofrer interagir com o mesmo.

Decompondo a parcela da radiância do meio:

$$L_m(\vec{x}, \vec{w}) = \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_a(\vec{x}') L_e(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' + \int_{\vec{x}}^{\vec{x}_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_i(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-2)$$

tem-se para um ponto 3D  $\vec{x}'$  na trajetória do raio,  $L_e(\vec{x}', \vec{w})$  representa a radiância emitida pelo meio, com  $\sigma_a$  sendo o coeficiente de absorção do material

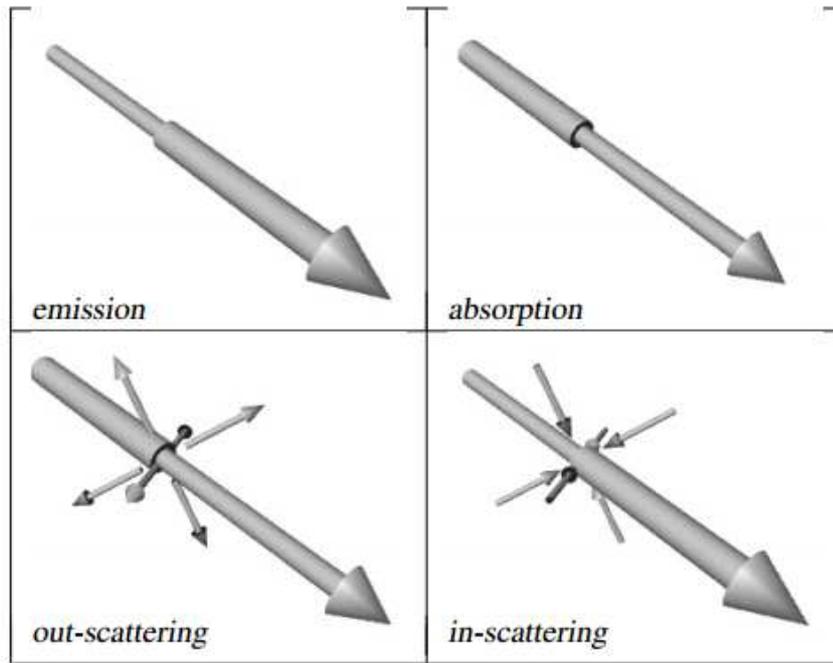


Figura 3.5: Efeitos resultantes da interação da luz com o meio. São exemplificados a absorção, emissão, dispersão de entrada (in-scattering) e dispersão de saída (out-scattering). Adaptada de [5].

em que a luz está passando e  $L_i(\vec{x}', \vec{w})$  a radiância segundo a dispersão de entrada no ponto  $\vec{x}'$  levando em conta o coeficiente de dispersão da luz no meio,  $\sigma_s$ .

O fator de transparência da radiância ao atravessar o meio é computado através da Equação (3-3), e representa a quantidade de radiação transmitida de um ponto  $\vec{x}_a$  até um ponto  $\vec{x}_b$  sem ser absorvida, de acordo com o modelo de decaimento óptico da luz. O decaimento é modelado pela integral da Equação (3-4), onde  $\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$  representa o coeficiente da radiância dissipada.

$$T(\vec{x}_a, \vec{x}_b) = e^{-\tau(\vec{x}_a, \vec{x}_b)} \tag{3-3}$$

$$\tau(\vec{x}_a, \vec{x}_b) = \int_{\vec{x}_a}^{\vec{x}_b} \sigma_t(\vec{x}) dx \tag{3-4}$$

A radiância segundo a dispersão de entrada no ponto  $\vec{x}'$ ,  $L_i(\vec{x}', \vec{w})$ , é definida pela Equação (3-5) como sendo a integral da radiância que chega a um ponto 3D  $\vec{x}'$  por todas as direções  $\vec{w}_i$  ponderadas pela função de fase  $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i)$ :

$$L_i(\vec{x}', \vec{w}) = \int_{S^2} L(\vec{x}', \vec{w}_i) \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i \tag{3-5}$$

A avaliação recursiva de  $L(\vec{x}', \vec{w}_i)$  na Equação (3-5) torna difícil a computação da equação de transporte da radiação. O modelo de iluminação

por oclusão direcional [4] propõe modificações nessa equação de transporte da radiação sem que a visualização seja significativamente prejudicada e reduzindo bastante o custo computacional. Assume-se que o meio não emite radiação  $L_e(\vec{x}', \vec{w}) = 0$ , que apenas as radiações de primeira ordem são consideradas no modelo (eliminando a recursão da integral) e que a dispersão da luz só ocorre na função de fase cônica com ângulo de abertura  $\theta \in [0, \frac{\pi}{2})$ , definida pela Equação (3-6)

$$\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi(1-\cos\theta)} & \text{se } \langle \vec{w}, \vec{w}_i \rangle > \cos\theta \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (3-6)$$

onde o raio  $r = \frac{1}{2\pi(1-\cos\theta)}$  normaliza a função de fase ( $\int_{S^2} \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i = 1$ ),  $\vec{w}$  corresponde à direção do observador e  $\vec{w}_i$  é escolhido de forma que  $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) \neq 0$ .

Tem-se então que para um raio de direção  $\vec{w}_i$ , saindo do volume em  $x'_{0,i}$  com a direção do observador  $\vec{w}$ , a Equação (3-1) que define  $L(\vec{x}', \vec{w}_i)$  pode ser simplificada pelas seguintes equações:

$$L_m(\vec{x}, \vec{w}) = \int_{\vec{x}}^{x'_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_i(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-7)$$

$$L_i(\vec{x}', \vec{w}) = L_a V(\vec{x}', \vec{w}) \quad (3-8)$$

$$V(\vec{x}', \vec{w}) = \int_{S^2} T(\vec{x}', x'_{0,i}) \Phi(\vec{w}, \vec{w}_i) d\vec{w}_i \quad (3-9)$$

onde a radiação segundo a dispersão de entrada  $L_i(\vec{x}', \vec{w})$  no ponto  $\vec{x}'$  é dada pelo produto entre a radiação ambiente  $L_a$ , e o termo de visibilidade fracionário  $V(\vec{x}', \vec{w})$ , o qual é equivalente ao fator de oclusão utilizado na técnica de oclusão por ambiente e representa o quanto de luz ambiente atinge o ponto  $\vec{x}'$ , ponderado pela função de fase cônica  $\Phi(\vec{w}, \vec{w}_i)$ .

A equação resultante proposta no modelo de iluminação por oclusão direcional é:

$$L(\vec{x}, \vec{w}) = T(\vec{x}, \vec{x}_0) L_b(\vec{x}_0, \vec{w}) + \int_{\vec{x}}^{x'_0} T(\vec{x}, \vec{x}') \sigma_s(\vec{x}') L_a V(\vec{x}', \vec{w}) d\vec{x}' \quad (3-10)$$

a fim de reproduzir essa equação, Schott et al propõem a utilização de um buffer para acumular a oclusão na trajetória do raio, tornando possível que a integração dos fatores de oclusão, descritos pela Equação (3-9), sejam aproximados de forma mais eficiente. No capítulo seguinte será abordada a aplicação desse modelo de iluminação utilizando visualização volumétrica

baseada no algoritmo de traçado de raios.

Esse modelo de iluminação permite que sejam obtidos resultados similares à oclusão por ambiente sem a necessidade de se avaliar a oclusão de maneira local em uma vizinhança esférica, além de ser levado em conta todas as características do volume entre o ponto a ser iluminado e a luz ambiente direcional. A iluminação é realizada sem utilizar a normal, podendo ainda serem controlados parâmetros da visualização, tais quais o ângulo de abertura do cone, que representa a região onde a luz se dispersa, bem como a função de transferência, que controla a cor emitida pela amostra do volume e a opacidade.