

1 Introdução

1.1. Interpretação sísmica e falhas

O método direto de identificação de reservatórios de hidrocarbonetos em subsuperfície consiste na perfuração de poços. Embora, obviamente, a perfuração seja necessária para a extração de óleo e gás, ela apresenta duas desvantagens como método de exploração: fornece apenas informações pontuais e tem um custo elevado¹. Por outro lado, os métodos indiretos de investigação são mais baratos e geram informações sobre grandes áreas ou volumes da subsuperfície. Dentre estes, o mais empregado é a sísmica de reflexão. Esse método se baseia na utilização de uma fonte sísmica artificial (por exemplo, explosões de dinamite, no caso terrestre, ou canhões pneumáticos, no caso marítimo) para gerar ondas mecânicas que se propagam através das camadas rochosas. Receptores dispostos na superfície (geofones, no caso terrestre e hidrofones, no caso marítimo) registram os sinais que são refletidos pelas interfaces entre camadas geológicas diferentes. Atualmente, a maioria dos levantamentos sísmicos é tridimensional, isto é, coletam sinais referentes a porções volumétricas da subsuperfície, gerando dados da ordem de terabytes. Os dados adquiridos são submetidos ao chamado processamento sísmico, que compreende um conjunto de técnicas que atuam sobre os dados de forma a retirar ou minimizar eventos indesejáveis, aumentando a relação sinal-ruído. O objetivo do processamento sísmico é facilitar a interpretação dos dados sísmicos.

Os dados resultantes correspondem a uma função escalar tridimensional das variáveis discretas espaciais x , y e do tempo t ². Cada valor da função,

¹ Um poço da bacia de Campos tem um custo da ordem de 10 milhões de dólares. Poços em águas ultraprofundas perfurando grandes camadas de sal, como no campo de Tupi da bacia de Santos, podem ter um custo superior a 100 milhões de dólares.

² A variável de tempo está associada ao tempo decorrido entre a geração do pulso em superfície, sua reflexão por um refletor em subsuperfície e, finalmente, seu registro

chamada de amplitude sísmica, é proporcional à energia refletida pela interface. Um conjunto de amostras de amplitudes como uma função do tempo t para x, y constantes é denominado traço sísmico. A Figura 1-1 abaixo mostra um traço sísmico (a), uma seção bidimensional (b) extraída de um volume sísmico (c) e o mapa de cores utilizado (d) para gerar estas imagens sísmicas. O mapa de cores associa a cor azul aos valores mais negativos da amplitude, a cor vermelha aos mais positivos, passando pela cor branca, associada ao valor zero.

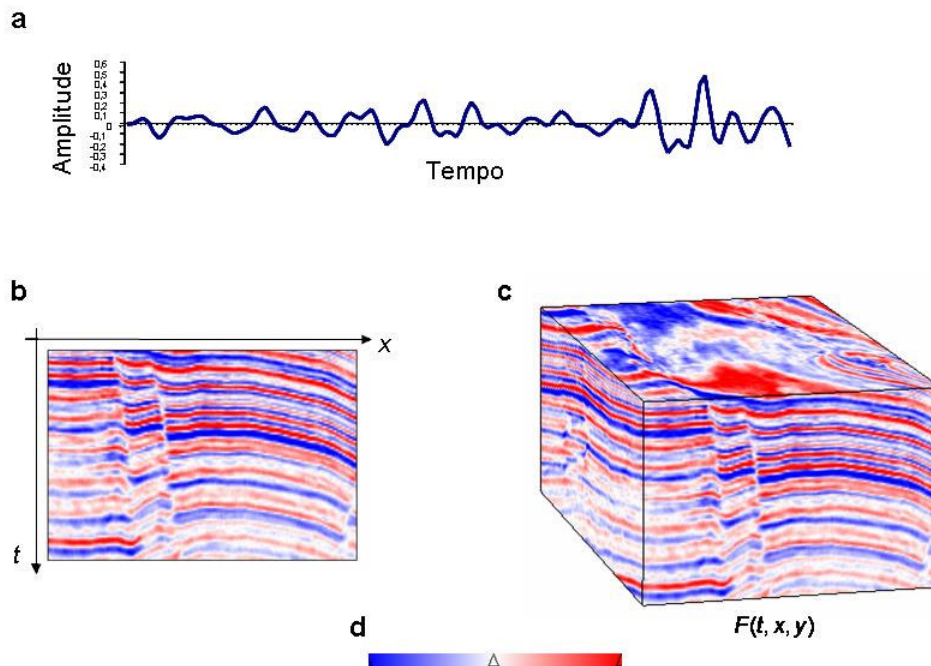


Figura 1-1: Dados sísmicos. Traço sísmico (a). Seção sísmica 2D (b). Volume sísmico (c). Mapa de cores utilizado em b e c (d).

Para a indústria de petróleo, a interpretação sísmica visa identificar estruturas onde o óleo possa estar aprisionado em um reservatório. O óleo é mais leve do que a água, portanto um reservatório não é possível a menos que o óleo esteja impedido de escapar. Assim, é necessária a ocorrência de uma camada de rochas impermeáveis, normalmente folhelho³ ou sal, formando uma trapa (armadilha).

A interpretação sísmica começa pelo mapeamento da estrutura em larga escala dos dados. Essa interpretação estrutural consiste principalmente em criar

nos receptores. Métodos de conversão tempo-profundidade permitem trocar a variável de tempo por profundidade.

³ Rocha de granulação muito fina, formada pela compactação de argila ou silte.

horizontes e determinar superfícies de falha. Horizontes são superfícies criadas pelo intérprete através da seleção de um refletor (interface entre camadas diferentes) e seu acompanhamento ao longo do volume. A fratura de rochas em subsuperfície causada por forças tectônicas é chamada de falha. Falhas geram descontinuidades na estrutura de camadas que tornam a criação de horizontes mais difícil. Para ser capaz de continuar um horizonte cortado por uma falha é necessário conhecer o chamado rejeito (deslocamento) vertical entre dois lados de uma falha. Na imagem da Figura 1-1b acima é possível identificar duas falhas paralelas. Observe o efeito das falhas sobre os horizontes (acompanhe, por exemplo, os vales associados às amostras mais azuis na parte central da fatia da Figura 1-1b).

As falhas podem ser extremamente importantes na identificação de trapas de origem estrutural. Deslocando uma camada impermeável, uma falha pode criar uma trapa estrutural onde o óleo é aprisionado, ou pode romper a capa selante de uma trapa, gerando um vazamento (Lines et al., 2004). De forma semelhante, as falhas também são importantes na compreensão do fluxo de fluidos em um reservatório. Elas podem agir no sentido de gerar um selante, bloqueando o fluxo entre diferentes compartimentos de um reservatório, ou podem agir como condutores, permitindo a comunicação entre diferentes compartimentos (Randen, 2001). A Figura 1-2 abaixo mostra exemplos de falhas que geram um bom ou mal selante. No exemplo da Figura 1-2b, os fluidos podem migrar para fora do reservatório, enquanto na Figura 1-2a, a justaposição de camadas impermeáveis contra o reservatório gera um bom selante.

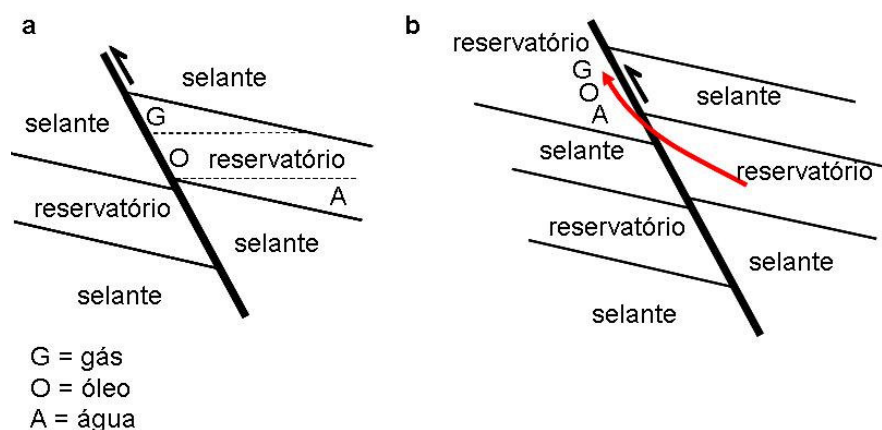


Figura 1-2: Exemplos onde uma falha gera um bom selante (a) ou um mal selante (b). Adaptada de Lines et al. (2004).

Existem vários tipos e subtipos de falhas: Duarte (2003), por exemplo, apresenta uma lista de 33 diferentes tipos ou qualificações para falhas. Aqui serão considerados apenas alguns aspectos geométricos das falhas⁴. Em geral, as falhas geram superfícies aproximadamente verticais, isto é, com alto ângulo de mergulho. Aquelas com ângulo inferior a 45° são chamadas de falhas de baixo ângulo. As falhas também podem ser divididas em planares e curvas. Uma falha é planar, em termos estatísticos, quando a variação da direção da superfície encontra-se no intervalo de aproximadamente 5°. As falhas curvas são denominadas falhas lítricas. Em perfil, variam desde uma falha de alto ângulo até baixo ângulo, podendo mesmo horizontalizar-se (Figura 1-3).

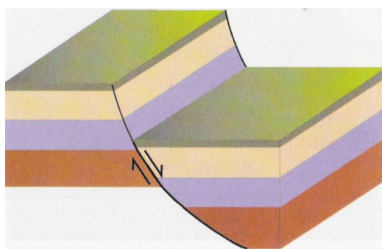


Figura 1-3: Bloco diagrama mostrando uma falha lítrica. Adaptada de Machado et al. (2000).

Considerando o movimento relativo entre os blocos separados por uma falha, podem-se ter falhas normais (ou de gravidade) e falhas reversas (ou de empurrão). Numa falha reversa (Figura 1-4b), a capa (isto é, o bloco situado acima do plano da falha) é o bloco que sobe em relação à lapa (bloco abaixo do plano de falha). No caso de falha normal (Figura 1-4a), ocorre o contrário. Como o movimento entre os blocos é relativo, torna-se difícil saber exatamente como ele ocorreu, pois várias combinações diferentes de movimentos de cada bloco podem gerar uma mesma configuração final.

⁴ Maiores detalhes sobre classificação de falhas podem ser vistos em livros-texto de geologia estrutural.

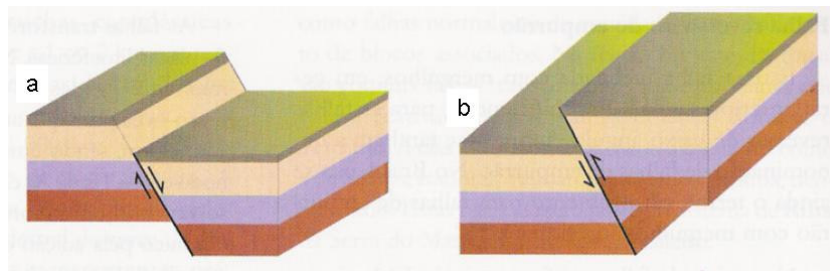


Figura 1-4: Falha normal (a) e falha reversa (b). Adaptada de Machado et al. (2000).

A automatização para acelerar a interpretação sísmica em grandes conjuntos de dados tridimensionais tem sido obtida no caso do rastreamento automático de horizontes (Dorn, 1998; Silva, 2004). Entretanto, a interpretação tridimensional de falhas permanece como uma tarefa manual.

1.2. Motivação e objetivos

Esta tese dá continuidade a uma série de trabalhos publicados, temas de dissertações e teses, e projetos desenvolvidos na gerência de Tecnologia Geofísica (TG) do E&P da Petrobras em colaboração com o Laboratório Tecgraf/PUC-Rio, na área de visualização de dados sísmicos.

Essa série se iniciou com a dissertação de Mestrado de André Gerhardt (Gerhardt, 1998), onde vários aspectos do uso de técnicas de visualização volumétrica em dados sísmicos foram discutidos, destacando, em particular, as limitações encontradas. Em Gerhardt et al. (1999) a visualização combinada de dados volumétricos com dados extraídos por segmentação foi testada em dados sísmicos. A segmentação por crescimento de regiões utilizada nesse trabalho introduziu informações geométricas ao processo de visualização volumétrica direta. Na dissertação de Mestrado do autor desta tese (Machado, 2000; Machado, 2001), a segmentação de dados sísmicos, com vistas à visualização combinada, foi abordada através de métodos baseados em espaços de escala. Em Gerhardt et al. (2001) foi introduzida a idéia de utilizar visualização volumétrica direta com opacidade bidimensional. Esta estratégia permite a visualização de eventos em um volume sísmico através da filtragem por opacidade sobre o histograma de dois volumes de dados diferentes. Em Silva et al. (2003) foi apresentada a idéia de se estimar a orientação dos eventos através do gradiente da fase instantânea com o objetivo de gerar visualização volumétrica com iluminação. A programação eficiente em placas de vídeo da opacidade bidimensional e da iluminação, bem como um método de extração de

horizontes sísmicos foram abordados na tese de Doutorado de Pedro Mário Silva (2004). Em meados de 2003, iniciou-se o projeto v3o2, um sistema de visualização volumétrica de dados sísmicos. Esse sistema tem dois objetivos principais: funcionar como uma ferramenta de controle de qualidade de dados sísmicos sob processamento e funcionar como um ambiente de pesquisas na área de visualização de dados sísmicos. As técnicas abordadas na tese de Silva (2004) foram implementadas diretamente no v3o2. O v3o2 também foi utilizado como plataforma de visualização na dissertação de Mestrado de Mauren Ruthner (2004), em que a transformada S foi utilizada para gerar a decomposição espectral dos dados sísmicos. A dissertação de Mestrado de Maurício Meinicke (2007) estendeu a estratégia de opacidade 2D do v3o2 para 3D.

É importante citar, também, a pesquisa desenvolvida no Tecgraf na mesma época desta tese que resultou na dissertação de Mestrado de Aurélio Figueiredo (2007). Nesse trabalho, o algoritmo de Aprendizado Competitivo Growing Neural Gas é utilizado como algoritmo de quantização de dados de forma a gerar uma classificação das amostras de um volume de amplitudes sísmicas. Esta classificação é posteriormente utilizada em um método semi-automático de extração de horizontes e falhas.

A dificuldade da visualização de dados sísmicos⁵ decorre do fato de que não é possível segmentar os dados com base em um processo simples de seleção de intervalos de valores da amplitude sísmica, como ocorre em dados médicos (Gerhardt, 1998). Assim, os esforços de pesquisa empreendidos através desta cooperação entre o Tecgraf e a TG têm se concentrado em duas frentes. Na primeira, visam ampliar a capacidade de seleção de eventos na visualização volumétrica direta pela combinação com eventos previamente segmentados (Gerhardt et al., 1999; Machado, 2000, 2001) ou pelo uso de opacidade multidimensional (Gerhardt et al., 2001; Silva, 2004). Numa segunda frente, são criados métodos de extração e visualização de eventos particulares, como no caso de horizontes sísmicos (Silva, 2004). Nesse sentido, a seqüência natural é o estudo de soluções para o caso de falhas, sendo este o foco das pesquisas desenvolvidas nesta tese.

Como visto na seção 1.1, falhas geram descontinuidades nos horizontes sísmicos. Existem vários algoritmos que geram indicadores de falha, isto é, um

⁵ Outro grande complicador na visualização de dados sísmicos diz respeito às dimensões dos dados. É comum se ter volumes da ordem de 1000x1000x1000 amostras.

campo escalar volumétrico que indica se cada posição do volume pode ou não ser uma posição por onde passa uma falha. Estes algoritmos geram os chamados atributos de falha (assunto discutido no cap. 2). O objetivo principal desta tese é, dado um atributo de falha, extrair e visualizar as superfícies de falha do volume.

Analisando a literatura⁶ referente ao problema de extração de superfícies de falha a partir de um atributo de falha (ver cap. 3), podem-se identificar três diferentes abordagens. A primeira (discutida na seção 3.2) consiste na aplicação de um algoritmo de afinamento (ou esqueletonização) baseado na avaliação da orientação local (Randen et al., 2001; Jeong et al., 2006; Cohen et al., 2006). Como resultado, gera um conjunto grande de pontos não necessariamente contíguos para serem visualizados, necessitando de um processamento posterior para a construção de uma malha triangulada simplificada. Na abordagem de Gibson et al. (2003) (apresentada na seção 3.3), a superfície é construída a partir de uma subamostragem do volume do atributo, gerando um conjunto de pontos que pertencem a retalhos planares. Esta subamostragem é precedida de uma binarização do atributo de falha através da aplicação de um limiar. Os retalhos são posteriormente combinados gerando superfícies maiores. Na terceira abordagem (seção 3.4), o volume do atributo de falha sofre inicialmente um processamento que inclui a supressão de pontos não-máximos (Hale, 2001), de forma a filtrá-lo e condicioná-lo. Sobre esse dado processado, um conjunto de átomos é disposto, de forma a satisfazer um modelo mecânico que define a interação dos átomos entre si e dos átomos com o campo associado ao atributo. Os átomos são então transformados em uma malha via triangulação de Delaunay ou geração de poliedros de Voronoi (Hale, 2001; Hale, 2002) e, finalmente, as falhas são extraídas aplicando-se um algoritmo de segmentação do grafo (Hale et al., 2002).

A abordagem proposta neste trabalho parte da idéia de que é possível se extrair um conjunto de pontos de cardinalidade muito inferior ao número de amostras do volume de atributo de falhas, mais informações de vizinhança entre os pontos e, ainda assim, se obter uma boa representação dos dados com todas

⁶ As pesquisas relativas à sismica aplicada à área de petróleo combinam fortemente a academia com a indústria. Um efeito dos interesses econômicos envolvidos nesta combinação é que muitos resultados obtidos são apenas parcialmente publicados ou simplesmente não são publicados. É comum também a utilização de patentes como forma de proteção da propriedade sobre os algoritmos propostos.

as suas inter-relações. Ou, em outras palavras, é possível reduzir o nível de redundância presente no atributo de falha, de forma a gerar uma representação das informações (estruturas de falha) mais econômica. Essa redução não só abre espaço para a aplicação de novos algoritmos para atacar o problema de extração de regiões de falha, como também é bem-vinda no momento da construção das superfícies de falha para visualização. Assim, o volume do atributo com amostragem regular é substituído por um conjunto de pontos com informações de vizinhança, isto é, por um grafo não-dirigido.

Se essa idéia, a princípio, segue a abordagem de Hale e Emanuel, a construção do grafo, por outro lado, é baseada não em um modelo mecânico determinístico, mas em um modelo probabilístico auto-organizável. Para tal, é empregado um algoritmo de Aprendizado Competitivo, o **Growing Neural Gas** (Fritzke, 1995), utilizando o volume de atributo de falha como uma função de probabilidades. A característica fundamental desse tipo de algoritmo é que a topologia do grafo gerado é variável conforme a estrutura subjacente nos dados de entrada (atributo de falha). Pode-se dizer que o Growing Neural Gas aprende quais topologias estão presentes em diferentes regiões dos dados de entrada. A solução do problema de extração de regiões de falha corresponde, então, a extrair os subgrafos com estrutura compatível com uma superfície de falha⁷. Desse modo, também diferente do que é feito no trabalho de Hale e Emanuel, não se lança mão de nenhum tipo de processamento de imagens para filtrar os eventos do atributo de falhas.

Para resolver o problema da visualização de superfícies de falha, por sua vez, este trabalho propõe um novo algoritmo batizado de **Malhas Neurais Abertas**. Esse algoritmo, também baseado em Aprendizado Competitivo, gera um grafo com topologia fixa, organizado em células triangulares. O algoritmo pressupõe que as amostras de maior valor dos dados de entrada (interpretados como probabilidades) têm uma estrutura equivalente ao disco (uma variedade de dimensão 2 com bordo), isto é, se distribuam, aproximadamente, por uma superfície não-fechada. Esse requisito é satisfeito tomando-se, como dado de

⁷ Em Figueiredo (2007) o Growing Neural Gas é utilizado para quantizar dados e não como gerador de grafo que preserva a topologia, como nesta tese (ver seção 4.5). Em termos de objetivos, o método de Figueiredo busca uma classificação semi-automática de um volume de amplitudes sísmicas, enquanto nesta tese se busca a construção automática de malhas adaptadas às falhas, a partir de um volume de atributo de falha.

entrada, o conjunto de amostras obtido pelo mapeamento inverso de cada subgrafo (gerado anteriormente) sobre o volume do atributo de falha.

Esta tese também propõe uma utilização diferente para o Growing Neural Gas de forma a construir uma malha geológica. Malhas geológicas são utilizadas para simular o comportamento de fluidos em reservatórios em subsuperfície.

Todos os algoritmos abordados nos capítulos 4, 5 e 6 desta tese, tanto os extraídos da literatura como os propostos, foram implementados pelo autor como *plug-ins* do ambiente v3o2. O tensor de estrutura do gradiente (apêndice A) também foi implementado de forma a avaliar o efeito do pré-processamento utilizado no modelo de átomos de Hale (ver seção 3.4.1.1). Com o uso destas implementações foram gerados vários resultados, utilizando dados sintéticos e reais, 2D e 3D que permitiram avaliar os algoritmos considerados.

1.3.

Estrutura do documento da tese

A tese é composta de 7 Capítulos. Os Capítulos 2 e 3 apresentam de forma sucinta um conjunto de conceitos e trabalhos relacionados com as propostas que são desenvolvidas na tese. Embora sejam importantes no sentido de gerar uma compreensão sobre o contexto a partir do qual as idéias desta tese foram geradas, pode-se dizer que esses Capítulos não são fundamentais para a compreensão do resto do documento.

O Capítulo 2 apresenta alguns dos principais atributos utilizados como indicadores de falha. Atributos são dados gerados a partir da amplitude sísmica com o objetivo de explicitar determinado tipo de informação contida nos dados originais. Esta apresentação inclui também um novo atributo de falha de cuja lista de autores participa o autor desta tese.

O Capítulo 3 apresenta as técnicas disponíveis na literatura utilizadas para a extração das superfícies a partir dos atributos de falha. O capítulo se encerra apresentando a proposta desta tese para o problema de extração e visualização de falhas (seção 3.5). As etapas dessa proposta são detalhadas nos três capítulos seguintes. Uma opção de leitura mais rápida deste documento seria iniciar a leitura pela seção 3.5.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos de Aprendizado Competitivo e o algoritmo Growing Neural Gas, além de detalhes sobre a implementação e a eficiência desse algoritmo. O capítulo mostra a utilização do Growing Neural Gas como um extrator das principais estruturas de falha presentes em um volume

sísmico. É apresentada também uma nova proposta de uso desse algoritmo para a construção de malhas geológicas.

O Capítulo 5 discute como o grafo gerado pelo Growing Neural Gas pode ser segmentado de forma que cada subgrafo corresponda a uma falha diferente presente nos dados.

O Capítulo 6 discute o uso de algoritmos de Aprendizado Competitivo em visualização. Dessa discussão resulta a proposta do algoritmo de Malhas Neurais Abertas que permite a construção de uma malha de triângulos para cada superfície de falha.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.