



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Processamento Avançado de Dados GPR Multi-Offset.

HUGO SANTOS DE SOUZA

Belém
2019

HUGO SANTOS DE SOUZA

Processamento Avançado de Dados GPR Multi-Offset.

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

Área de concentração:
Métodos Sísmicos

Linha de pesquisa:
Sísmica Aplicada à Exploração e Caracterização de Reservatórios

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ellen de Nazaré Souza Gomes

Belém
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S719p Souza, Hugo Santos de Souza
Processamento avançado de dados GPR multi-offset / Hugo
Santos de Souza Souza. — 2019.
29 f. : il. color.

Orientador(a): Prof.^a Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes Gomes
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. GPR multi-offset. 2. Processamento multi-canal. 3.
Interpolação de traços. I. Título.

CDD 550

HUGO SANTOS DE SOUZA

Processamento Avançado de Dados GPR Multi-Offset.

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

Data de aprovação: 30 de julho de 2019

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Ellen de Nazaré Souza Gomes (Orientadora)
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Saulo Siqueira Martins
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Diego da Costa Miranda
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais Ronaldo e Lourdes...

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido o dom do conhecimento, e ter me dado saúde e paz de espírito necessária para superar as dificuldades.

Aos meus pais Ronaldo e Lourdes, pelo o amor, incentivo e dedicação que sempre me proporcionaram.

Ao meu irmão, Bruno pelo o apoio meio de palavras e conselhos que sempre me motivaram.

À minha orientadora, Profa Dra Ellen de Nazaré Souza Gomes, pelo o suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas as suas correções e incentivos.

Ao Prof. Saulo Martins por sua disponibilidade de sempre está tirando minhas dúvidas durante o processo de produção.

Aos professores que compõem a banca examinadora por terem participado e contribuído para este trabalho.

Aos demais professores da Pós Graduação em Geofísica pelos ensinamentos e/ou contribuições ao meu trabalho.

À amiga Marly Albuquerque, pelos incentivos e correções gramaticais do trabalho.

Ao amigo Rodolfo Dirack, por ter me ajudado com os seus conhecimentos na parte de programação.

EPÍGRAFE

“A persistência é o menor caminho para o êxito”. Charles Chaplin

RESUMO

A aquisição convencional de dados GPR (Ground Penetrating Radar) são realizados com equipamentos monocanais, geralmente ao longo de perfis de offset-fixo, tendo uma análise de velocidade obtida somente em pontos isolados do levantamento, na qual ocorre os afastamentos entre antenas transmissoras e receptoras em relação ao ponto médio comum (CMP), gerando um modelo de velocidade que se limita ao caso 1D. Por este motivo, se torna inviável a aplicação de técnicas de processamento avançado de dados que permitem a obtenção de uma imagem de radar de alta qualidade. Neste trabalho é proposto um fluxo de processamento para dados GPR-multi-offset, que foram adquiridos por meio de um conjunto de 7 perfis colineares de offset-fixo diferente após a aplicação de técnicas de binagem e interpolação de traços para simular dados GPR multi-offset, organizadas em famílias de tiro comum. Com as etapas do processamento de dados foi possível gerar um modelo de velocidade RMS 2D satisfatório, que permitiu obter bons resultados nos processos de empilhamento e migração em tempo, contribuindo para seções com melhor relação sinal-ruído e na identificação de novos eventos de interesse.

Palavras-chaves: GPR muti-offset, Interpolação de Traços, Processamento multi-canal.

ABSTRACT

The Conventional Ground Penetrating Radar (GPR) data acquisition is performed with single-channel equipment, usually along fixed-offset profiles, having a velocity analysis obtained only in isolated points of the survey, at the locations of variable offset gathers such as a common midpoint (CMP), generating a velocity model that is limited to the 1D case. For this reason, advanced data processing techniques that enable high quality radar image becomes unfeasible. In this work is proposed a processing flow for GPR-multi-offset data that was acquired through a set of 7 different fixed-offset collinear profiles. We apply binning and interpolation techniques to simulate multi-offset GPR data, organized in Common Shot Gather. The processing data flow generated a satisfactory 2D rms velocity model that allowed to obtain good results in the stacking and migration processes in contributing to better signal-to-noise ratios and identifying new events of interest.

Keywords: GPR processing, GPR multi-offset, GPR interpolation data, Processing and imaging of radar data .

LISTA DE FIGURAS

2.1	Mapa de Localização da aquisição GPR realizada no interior do Continente Antártico, o ponto amarelo é o local onde foi realizado a aquisição GPR. Painel à direita mostra os perfis FO (Fixed Offset).	3
3.1	Painel à esquerda mostra os 7 perfis FO utilizados para o processo de binagem e o trilho central (linha mais espessa em azul). Painel à direita mostra um esquema do processo de binagem utilizado para obter uma simulação de dados multi-offset esparso(famílias de tiro comum)	6
3.2	Família de tiro comum com 7 traços de offsets esparços gerados após o processo de binagem dos perfis. Fonte: (Martins, 2013)	7
3.3	Painel à direita mostra a família End On Central. Painel do meio família <i>End On</i> Esparso, com 7 traços. Painel à esquerda família <i>End On</i> Interpolada. Fonte: Martins (2013)	10
3.4	(a)seção FO sem interpolação, realizada com tração de moto de neve, com offset = 1,5 m e extensão 2 km ; (b) seção FO com zoom na região entre 1500m e 2000m; (c)seção GPR multi-offset simulado a partir dos sete perfis FO adquiridos por tração humana, de extensão de aproximadamente 500m e organizada em offset mínimo depois da interpolação.	12
4.1	Fluxo de processamento aplicado nos dados GPR multi-offset.	14
4.2	Painel à esquerda mostra seção de afastamento comum receptor 1. Painel à direita mostra a seção de afastamento comum de receptor 16	15
4.3	Seção de GPR multi-offset organizado em afastamento mínimo (a) dado sem filtro. (b) dado filtrado	16
4.4	Análise de velocidade formado por 3 painéis interativos, à esquerda painel semblance com os picking de velocidades, ao meio a seção CMP seguido pelo o empilhamento dinâmico e à direita o painel CVS (Common Velocity Stack: vários CMPs são corrigidos por NMO e empilhados a uma velocidade constante	19
4.5	Painel à esquerda mostra o modelo de velocidade RMS 2D. Painel à direita mostra o resultado do processo de empilhamento - seção CMP empilhada .	21
4.6	Painel à esquerda mostra a seção migrada pré-empilhamento 2D em tempo. Painel à direita mostra a seção migrada pós-empilhamento 2D em tempo. .	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ÁREA DE ESTUDO	3
3	SIMULAÇÃO PARA DADOS GPR MULTI-OFFSET	5
3.1	BINAGEM	5
3.2	INTERPOLAÇÃO	7
4	PROCESSAMENTO DE DADOS	13
4.1	GEOMETRIA	14
4.2	EDIÇÃO DE DADOS	15
4.3	FILTROS E GANHOS	15
4.4	ANALISE DE VELOCIDADE	16
4.5	CORREÇÃO NMO	19
4.6	EMPILHAMENTO	20
4.7	MIGRAÇÃO	22
5	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é um método geofísico de imageamento de subsuperfície muito utilizado devido sua praticidade e a grande resolução do meio, tendo como sua maior aplicabilidade investigações rasas (Benson, 1995; Hermance, 2001; Annan, 2003).

Os dados são adquiridos mais comumente de modo Biestático, por intermédio de perfis de offset-fixo -*Fixed Offset* (FO) contínuo, gerando uma amostragem unitária da subsuperfície, ou seja, apenas um único traço é adquirido para cada posição ao longo do perfil. Nesse caso, para se adquirir um modelo de velocidade da subsuperfície é comum utilizar-se de técnicas de análise de velocidade baseadas no "Ajuste de hipérbole de difração" ou por meio de um número limitado de perfis CMP, ambas resultam em um modelo de velocidade pontual (1-D), que geralmente é extrapolado para toda a área (Forte et al., 2014; Martins and Travassos, 2015). No entanto, para meios que possuem uma variação lateral de velocidade tais técnicas resultam em estimativas incorretas, o que impossibilita o processamento avançado de dados (Forte et al., 2014).

Isto, em parte é reflexo das limitações do sistema GPR comerciais atualmente disponíveis, que em sua maioria, são constituídos por duas antenas acopladas, sendo uma transmissora e outra receptora. Além disso, a dificuldade operacional demandada pelo o grande esforço de aquisição necessária para adquirir dados em multi-offset (Annan, 2003).

Nos dados de GPR multi-offset, conhecidos como multi-fold, CMP ou Wide Aperture Reflection and Refraction (WARR), os pontos em subsuperfície são amostrados mais de uma vez a partir de múltiplas trajetórias, similar ao realizado na sísmica de reflexão multicanal (Neal, 2004; Berard and Maillol, 2007; Martins and Travassos, 2015).

Por conta disso, muitos trabalhos utilizam estratégias similares para agilizar a aquisição e cobrir uma área maior simulando essa configuração através de equipamento monocanal Biestático, adquirindo vários perfis FO contínuos e colineares entre si, variando a distancia entre transmissora e receptora em cada perfil. Como regra, a aquisição de dados multi-offset no método GPR é trabalhosa, mas o aumento na qualidade dos dados não pode ser negligenciado. Artigos com essa metodologia são descritos por (Fisher et al., 1992; Greaves et al., 1996; Pipan et al., 1999; Leparoux et al., 2001; Grasmueck et al., 2005; Bradford et al., 2009; Gerhards et al., 2008; Bradford, 2008; Martins and Travassos, 2015; Martins et al., 2016).

Este tipo de levantamento possui diversas vantagens, como a organização dos dados em um conjunto de famílias CMP, permitindo uma análise de velocidade para gerar um macromodelo de velocidade 2D e a aplicação de um fluxo de processamento convencional similar a utilizada na sísmica, para a obtenção de seções GPR empilhadas, que proporcionam um aumento na profundidade de penetração, e melhor relação sinal-ruído, além de seções

migradas em tempo e em profundidade que permitem colapsar eventos de difração e melhorar a continuidade dos refletores, gerando imagens de radar de alta qualidade (Pipan et al., 1999; Berard and Maillol, 2007; Forte and Pipan, 2016).

O processamento desses dados diferencia-se em alguns aspectos do processamento utilizado na sísmica convencional. Visando reduzir essa limitação, a proposta da organização de um fluxo de processamento para dados de GPR multi-offset, sistematizando a aplicação prática de processos em suas etapas, centraliza o principal objetivo deste trabalho.

O trabalho apresentado consiste em propor um fluxo de processamento avançado aplicado em dados GPR multi-offset, que foram adquiridos a partir de um conjunto de 7 perfis FO, colineares e com diferentes valores de offset, no interior do continente Antártico. Antes de serem processados, os dados foram tratados através de processos de binagem e interpolação de traços, com o intuito de simular os perfis FO obtidos em campo para um conjunto de dados multi-offset organizadas em famílias de tiro comum – *Common Shot Gathers* (CS), padrão *End On* (EO). O fluxo de processamento gera como produto um modelo de velocidade RMS 2D, seção CMP empilhada e seções migradas em tempo.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi no interior do continente Ártico, localizado em 84 S, conforme Figura 2.1

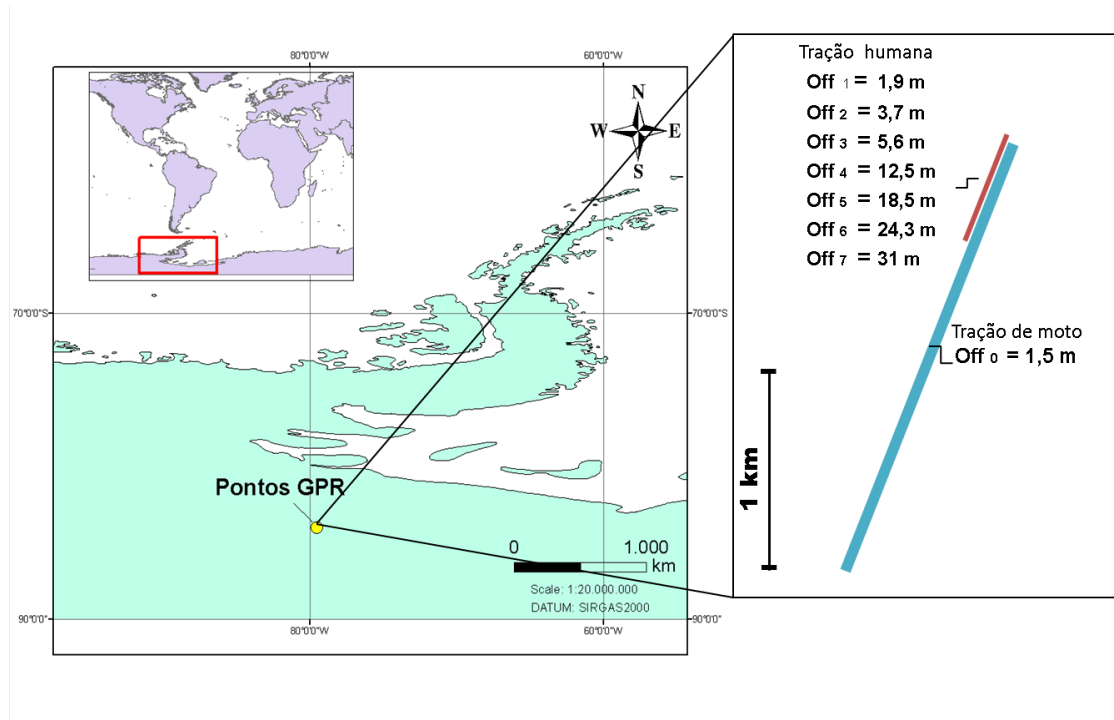


Figura 2.1: Mapa de Localização da aquisição GPR realizada no interior do Continente Antártico, o ponto amarelo é o local onde foi realizada a aquisição GPR. Painel à direita mostra os perfis FO (Fixed Offset).

Os dados GPR foram adquiridos com o equipamento PULSE EKKO Pro GPR com 100 MHz, antenas não blindadas, montadas em configuração perpendicular através de um trem de aquisição composto de 3 ou mais trenós, dependendo do tipo de tração utilizado, manual ou por uma moto de neve. O trem de tração manual era composto de 5 trenós, o primeiro e o último serviam para o transporte de carga e como estabilizador de movimento, o segundo carregava a antena transmissora, o terceiro o GPS e o quarto a antena receptora. Na tração com a moto, foi adotada uma configuração semelhante. O primeiro trenó possuía um GPS, o segundo e o terceiro carregavam as antenas transmissora e receptora, e o quarto trenó um segundo GPS. Foi amarrado um saco com gelo no último trenó com o propósito de estabilizar o movimento. A combinação de bases locais e remotas deve ser suficiente para garantir uma precisão de posicionamento pós-processada do GPS móvel em torno de 0,05m (Martins, 2013).

Foram gerados vários perfis no sentido S-N, sendo que um dos perfis foi obtido por tração de moto de neve, com maior extensão, de aproximadamente 2 km e com o offset-*fixo* (Off_0) = 1,5 m, registrando 1358 traços. Os demais perfis foram coletados por tração

humana, totalizando sete perfis ($k=1,\dots,7$) com diferentes valores de offset-fixo ($Off_k = 1.9, 3.7, 5.6, 12.5, 18.5, 24.3$ e 31m) e dispostos de maneira colineares, com comprimento de aproximadamente 500m , conforme mostra o painel à direita da Figura 2.1

O perfil mais longo, obtido por tração de moto, visa imagear grandes extensões da estratigrafia do local e os vários perfis realizados com tração humana, tiveram como objetivo permitir simular dados GPR multi-offset e assim produzir um modelo de velocidade 2-D, assim como seções migradas no tempo. Este processo torna-se possível através da técnica de binagem, que visa reagrupar os sete perfis em apenas um, simulando famílias de tiro comum.

3 SIMULAÇÃO PARA DADOS GPR MULTI-OFFSET

Para simular dados GPR multi-offset a partir dos 7 perfis FO adquiridos no levantamento, foi realizado duas etapas: A primeira etapa foi utilizar a técnica da binagem para reordenar a posição dos transmissores e receptores para formar um perfil colinear afim de agrupar os traços em famílias de tiro comum esparsos. A segunda etapa foi aplicado o processo de interpolação de traços para solucionar o problema do alising espacial das recém-formadas famílias de tiro comum.

3.1 BINAGEM

Na binagem os perfis são reorganizados dentro de áreas discretas chamadas bin. Todas os pontos que caem na área do bin irão pertencer a mesma posição. O bin é colocada sobre os pontos reais ao longo dos perfil. Cada bin gera uma famílias de pontos em comum.

O processo de binagem é mais comumente aplicado em traços CMP, na qual os traços pré-empilhados são selecionados dentro de grupos associados a traços que possuem a mesma localização de ponto médio, com o intuito de aumentar a relação sinal-ruído da seção e permitir a geração de um modelo de velocidade 2D (Linner, 1999; Yilmaz, 2001; Vermeer, 2002).

Para construir seções de dados multi-offset nas seções de GPR, foi utilizado o mesmo raciocínio, no entanto, ao invés de coletar as coordenadas referentes ao CMP, foram coletadas coordenadas da fonte ou transmissor do sinal. As posições de fonte que caem dentro de um bin geram famílias de tiro comum.

Para a realização do processo de binagem foi gerado um trilho central para que o bin percorra os perfis coletando as posições das fontes. O trilho foi calculado através da média das posições de fonte do conjunto dos 7 perfis FO. Em seguida, a dimensão do bin e do incremento foram estabelecidas obedecendo a condição de coletar na área delimitada a posição de no mínimo uma fonte (s_k) de cada perfil FO e assim garantir que todos os 7 offsets sejam representado em todos os bins. Após vários testes, foi utilizado o bin de raio de 3 m e incremento de 0,5m, que obteve a maior quantidade de bins contendo os 7 offsets, sendo descartado um total de 16 bins nas duas extremidades que não obedeceram a condição.

Geralmente, em cada bin caem mais de uma posição de fonte correspondente ao mesmo offset, no entanto, foi coletado apenas a localização da fonte (s_k) mais próxima do centro do bin (i), que se torna a nova posição de fonte ($S_{i,k}$), mantendo e realinhando os offsets originais de cada perfil. Cada bin simula uma recém família de tiro comum, padrão End On (EO), conforme Figura 3.1.

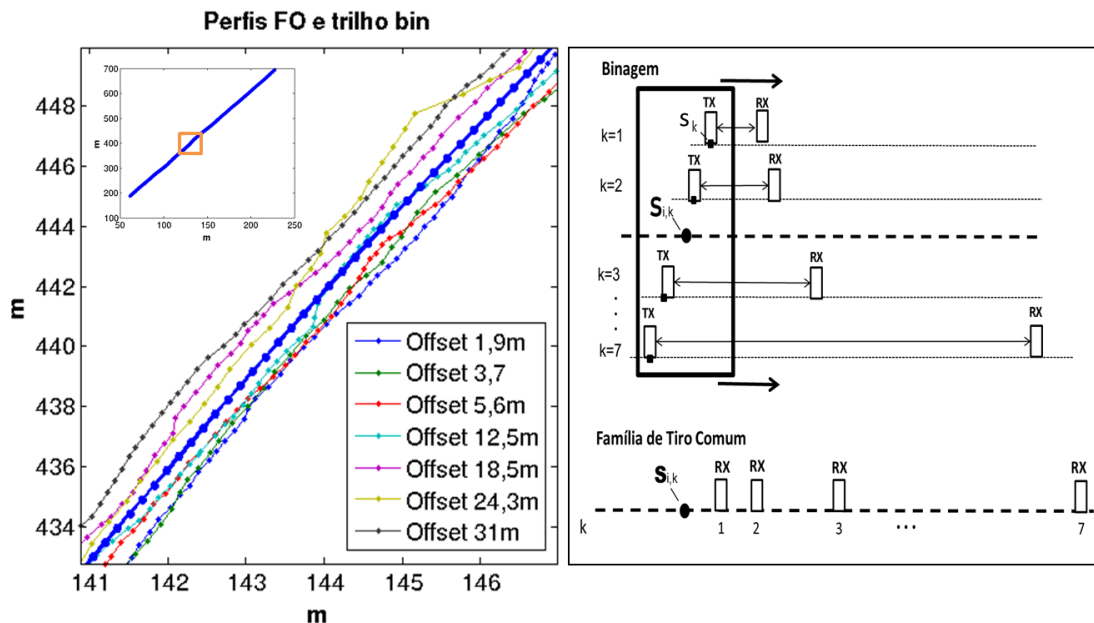


Figura 3.1: Painel à esquerda mostra os 7 perfis FO utilizados para o processo de binaagem e o trilho central (linha mais espessa em azul). Painel à direita mostra um esquema do processo de binagem utilizado para obter uma simulação de dados multi-offset esparsos (famílias de tiro comum)

Este procedimento é repetido a cada nova posição de bin que é estimada recursivamente a 0,5 m para a frente ao longo do trilho central até o final do perfil, sendo geradas 986 famílias de tiro comum ($S_{i,k}$, sendo $i=1, \dots, 986$ e $k = 1, \dots, 7$), e com uma amostragem espacial da fonte de 0,5 m. Cada família de tiro comum apresenta offsets esparsos e irregulares ($Off_k = 1.9, 3.7, 5.6, 12.5, 18.5, 24.3$ e 31m) com somente 7 traços, conforme mostra a Figura 3.2.

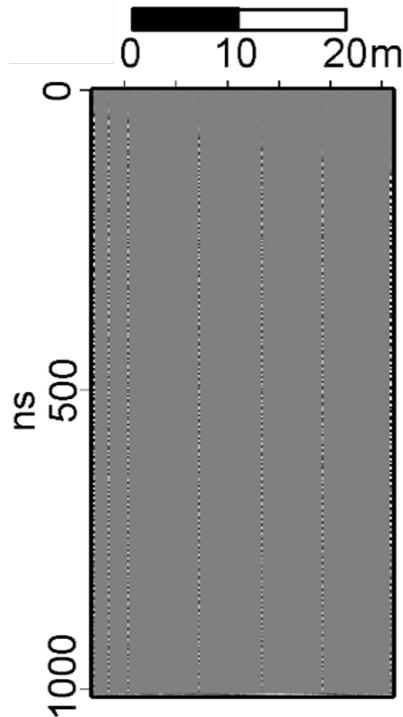


Figura 3.2: Família de tiro comum com 7 traços de offsets espaçados gerados após o processo de binagem dos perfis. Fonte: (Martins, 2013)

O conjunto de famílias de tiro comum gerados se apresenta pobre em informação e com grandes intervalos de amostragem espacial, o que prejudica na identificação de eventos e na qualidade do processamento dos dados, especialmente nas etapas que dependem de uma análise de velocidade. A baixa qualidade do processamento é causada muitas das vezes pelo *aliasing* espacial, onde o teorema da amostragem não é satisfeito.

3.2 INTERPOLAÇÃO

O problema da amostragem espacial dos traços (*aliasing*) que afeta a resolução da imagem foi minimizado utilizando a interpolação de traços. A interpolação de traços é uma alternativa viável, tanto na reposição de traços mortos dos dados de campo, quanto na melhoria da migração, quando os dados apresentam *aliasing* espacial. Apesar de não adicionar nova informação aos dados, a interpolação reduz o efeito indesejável do *aliasing*, permitindo que as altas frequências sejam preservadas na migração, melhorando a resolução da seção (Bardan, 1987; Larner et al., 1981).

Algoritmos de interpolação de dados têm sido amplamente utilizados para corrigir amostras espaciais irregulares de dados sísmicos. Vários trabalhos relatados na literatura usam a abordagem do problema da interpolação de traços sísmicos. As aplicações mais comuns são baseadas em algoritmos utilizando Transformada de Fourier Rápida (FFT) como exemplo (Liu and Sacchi, 2004; Zwartjes and Gisolf, 2006; Trad, 2009), na transformada de Radon, por exemplo, (Kabir and Verschuur, 2006; Wang et al., 2010; Trad

et al., 2003) , modelagem de regularização (Fomel, 2007; Chen et al., 2015) ou com filtros de predição de erro (PEFs) no domínio f-x e t-x (PEFs) (por exemplo (Spitz, 1991; Por-sani, 1999; Fomel, 2009; Wang, 2002; Liu and Fomel, 2011; Curry, 1999; Naghizadeh and Sacchi, 2009).

Uma discussão abrangente dos diferentes métodos de interpolação está além do escopo deste artigo, mas o leitor interessado pode facilmente encontrar isso na literatura Abma and Kabir (2005).

Apesar de ser uma prática comum em sísmica, a reconstrução de um campo de onda refletido através do conjunto de dados espacialmente subamostrado ainda é recente para dados GPR, como pode ser visto em alguns trabalhos como Strange (2013), no qual aplicou técnicas de interpolação às amostras no domínio do tempo tempo para aumentar a precisão da medição. Os resultados indicam que a interpolação dos traços GPR no domínio do tempo utilizado para aumentar a resolução é inferior quando comparada com a amostragem direta do traço a uma taxa de amostragem mais alta.

Yi et al. (2015) propuseram o método de interpolação interativa para dados GPR para simplificar a aquisição tridimensional de dados GPR e recuperar os traços perdidos. Esta abordagem permite a reconstrução da imagem a partir de dados escassamente amostrados que violam o critério de Nyquist. Os resultados mostraram que é possível reduzir a densidade de aquisição de dados em muitas aplicações GPR.

Martins and Travassos (2015) propuseram a construção de dados densos, utilizando Filtro de Predição de Erro (PEF) recorrendo a Autoregressão Não Estacionária Regularizada (RNA) seguido de modelagem da regularização, com algoritmo desenvolvido por Liu and Fomel (2011), sendo testado em dados GPR sintéticos e reais, sendo definidos parâmetros adequados para sua utilização e efetuada uma análise crítica de suas vantagens e limitações.

O método de interpolação adotado neste trabalho foi desenvolvido por Liu and Fomel (2011). Ele opera baseado na Filtragem de Predição de Erro (PEF) e Autoregressão Não Estacionária Regularizada (RNA). A teoria prevê que os PEFs no domínio do tempo-espaço podem ser usados para interpolar seções com alias, inserindo novos traços entre os originalmente gravados.

A teoria do PEF assume a estacionariedade, no entanto, os dados reais podem não obedecer este comportamento devido a presença de mergulhos que variam de acordo com a posição. O algoritmo lida com este problema com um PEF não estacionário que varia com a posição, dividindo os dados em janelas sobrepostas estacionárias assumidas Liu and Fomel (2011). Os coeficientes do filtro variam suavemente com microjanelas sobrepostas e suavização radial, portanto adaptável. Os PEFs são implementados no domínio t-x (tempo-espaço) e são menos prováveis para criar eventos espúrios na presença de ruído (Abma and Claerbout, 1995; Liu and Fomel, 2011).

O algoritmo de interpolação emprega uma estratégia de dois passos. O primeiro é

estimar os coeficientes do Filtro de Predição de Erro (PEF), recorrendo à auto-regressão estacionária não-regularizada, seguida pela modelagem para suavizar os coeficientes dos PEFs adaptativos. O segundo passo é utilizar os valores de coeficientes do PEF's adaptativos calculados para realizar a interpolação dos traços. Ambos os passos utilizam-se de um problema linear de mínimos quadrados para gerarem seus resultados. Mais detalhes sobre a metodologia (Fomel, 2007, 2009; Liu and Fomel, 2011).

Para estimar os coeficientes do filtro a serem usados como um modelo inicial, bem como para restringir o procedimento de inversão subsequente em cada família de tiro comum reunido ao longo do perfil, foi utilizado um *End On* Central de 100 m que foi coletado próximo ao centro do conjunto dos 7 perfis FO. Para tornar a família de *End On* Central do mesmo tamanho que as famílias de tiro comum (*End On* Esparso), geradas após o processo de binagem, na qual reduziu-se o dado para 31m e o número original de traços para 292.

Em seguida, o *End On* Central foi silenciado em 80 por cento dos 292 traços em vários intervalos distribuídos em distâncias logarítmicas crescentes, ampliando com offset. Os parâmetros são testados até chegarmos em um resultado satisfatório. Os valores de coeficientes do filtro obtidos são utilizados para interpolar os traços zerados e restaurar a coleta. Por último, os dados de *End On* Central são todos mudados exceto os traços da posição Off_k ou seja, deixando apenas 7 dos 292 traços originais. Foi utilizado os coeficientes de filtro estimados no processo anterior como um modelo inicial, bem como restringimos o procedimento de inversão subsequente para produzir uma coleta interpolada. Após esses testes, foi definido os parâmetros do PEF utilizados para realizar a interpolação nas famílias de *End On* Esparço. A verificação visual é complementada pela correlação cruzada bidirecional normalizada entre os *End On* interpolado e o *End On* Central, que atingiu valores menor que 0.1, demonstrando a independência dos resultados interpolados (Martins and Travassos, 2015).

O resultado da interpolação é mostrado na Figura 3.3. O painel à direita mostra a família *End On* Central. O painel do meio a família de *End On* Esparso, com 7 traços e o painel à esquerda a família *End On* Interpolada.

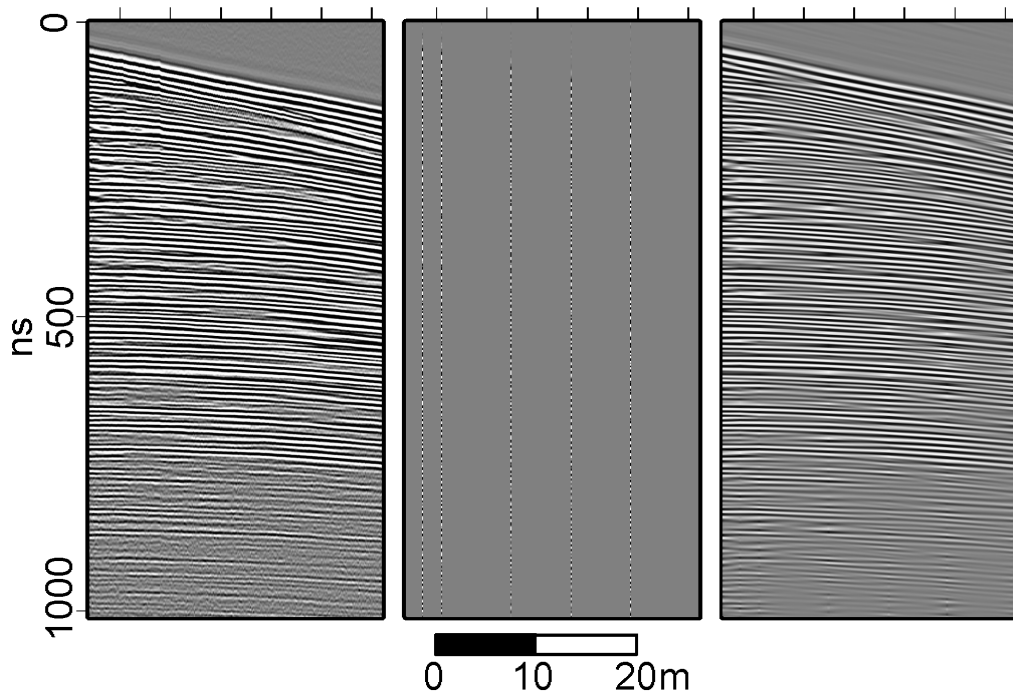


Figura 3.3: Painel à direita mostra a família End On Central. Painel do meio família *End On* Esparso, com 7 traços. Painel à esquerda família *End On* Interpolada. Fonte: Martins (2013)

Após a interpolação, cada família de tiro comum, padrão EO possui 292 traços, cada um com um incremento uniforme de 0,1m, totalizando 287.912 traços ao longo do perfil. Ao fim, todas as famílias de tiro comum se encontram livre do efeito *aliasing*, conforme podemos observar no painel à esquerda da Figura 3.3.

Um passo necessário para verificar a qualidade do conjunto de dados interpolados é utilizar alguns dos dados adquiridos no campo como referência. Uma das maneiras de fazer isso é comparar seções, uma com os dados obtidos diretamente no campo, conforme mostra a Figura 3.4 (a) Seção FO obtida com $Off_{f_0} = 1,5$ m, $FO_{Off_{f_0}}$. (b) A seção $FO_{Off_{f_0}}$ recortada nos últimos 500 m, conforme mostra região em vermelho. (c) Seção GPR multi-offset interpolada, organizada em afastamento mínimo, Off_{min} . Nas duas seções, $FO_{Off_{f_0}}$ e Off_{min} foram utilizadas fluxos de pré-processamento restritas a filtragem de tempo e fases de ganho, para que sejam comparáveis.

Na seção $FO_{Off_{f_0}}$, foram identificados alguns eventos marcados pelas as letras A, B, C, e D, com o intuito de servir como parâmetro para comparar as duas seções. Destaque para o evento D, que se estende de maneira contínua por toda a seção $FO_{Off_{f_0}}$ Para facilitar esta comparação, foi aplicado um zoom nos últimos 500 m da seção $FO_{Off_{f_0}}$, tornando-se mais fácil de analisar os eventos que ocorrem em ambas as seções, conforme pode ser visto na Figura 3.4 (b).

O perfil $FO_{Off_{f_0}}$ apresenta uma qualidade inferior em virtude da aquisição ter sido realizada por tração de moto de neve, obtendo menos pontos de amostragem espacial.

Já a seção Off_{min} tem uma melhor relação sinal-ruído, sendo mais rica em detalhes do que a seção obtida diretamente do campo FO_{ff_0} , conforme podemos observar através da quantidade de novos eventos visíveis (F e G), o que não era possível no FO_{ff_0} . Além disso, na seção interpolada aparece artefatos (evento S) que se caracteriza por cruzar os dois supostos refletores F e G.

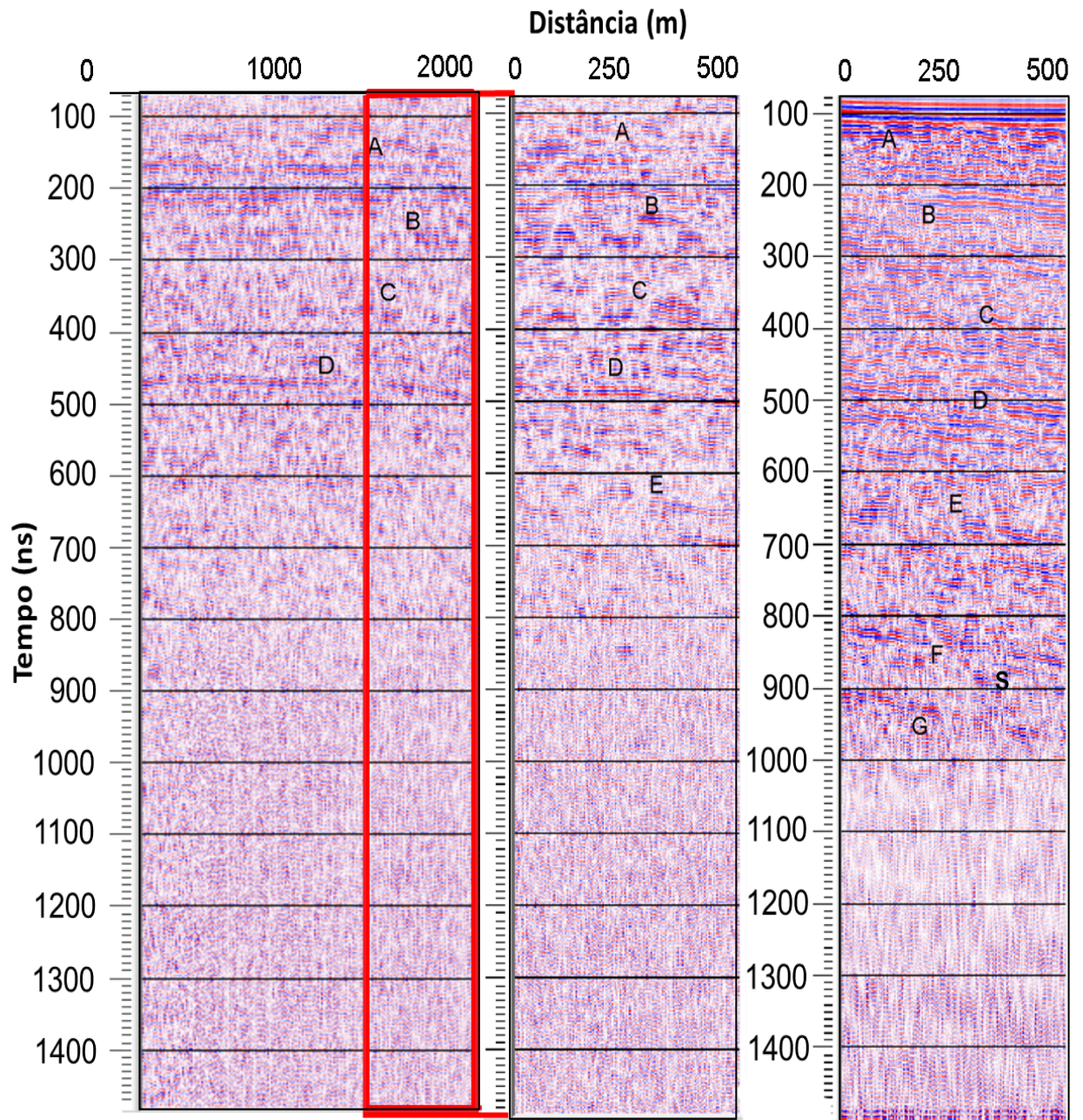


Figura 3.4: (a) seção FO sem interpolação, realizada com tração de moto de neve, com offset = 1,5 m e extensão 2 km ; (b) seção FO com zoom na região entre 1500m e 2000m; (c) seção GPR multi-offset simulado a partir dos sete perfis FO adquiridos por tração humana, de extensão de aproximadamente 500m e organizada em offset mínimo depois da interpolação.

4 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento sísmico é o conjunto de técnicas com o objetivo de aumentar a relação sinal/ruído, corrigir o dado de vários fenômenos físicos que obscurece as informações geológicas da seção sísmica e reduzir o volume de dados indesejados realçando os eventos de reflexão primária e atenuando os demais eventos, como reflexões múltiplas e outros tipos de ruídos. Tem como produto final seções em tempo e/ou profundidade (Dobrin, 1988; Yilmaz, 2001).

A fase de processamento foi aplicada nos dados GPR multi-offset produzido após a interpolação, que consistem em coletâneas brutas organizadas em famílias de tiro comum, padrão *End On*, caracterizadas por apresentar uma baixa relação sinal-ruído. Na tabela a seguir, mostra os parâmetros de aquisição do perfil.

Tabela 4.1: Parâmetros de aquisição do perfil GPR multi-offset.

Especificações	Dados
Numero de tiros	986
Intervalo entre os tiros (m)	0,5
Numero de receptores	292
Intervalo entre receptores	0,1
Tempo de registro (ns)	1500
Amostragem temporal (ns)	0,8
Afastamento mínimo (m)	0,1
Afastamento máximo (m)	31

Os principais alvos do processamento são os eventos indicados com as letras A, B, C, D, E, F e G, como mostra a seção organizada em afastamento mínimo Off_{min} , na Figura 3.4 (c).

O fluxo de processamento elaborado é realizado basicamente em duas fases: o pré-processamento e o processamento. A primeira fase engloba a preparação dos dados (leitura de dados, geometria e edição) e a utilização de técnicas de tratamento do sinal (Filtros e Ganhos) e a segunda reúne técnicas sofisticadas, como: análise de velocidade, a correção de NMO, o empilhamento CMP e a migração em tempo dos dados. O fluxograma ilustrado na Figura 4.1 mostra as sequências utilizadas no pré-processamento e no processamento.

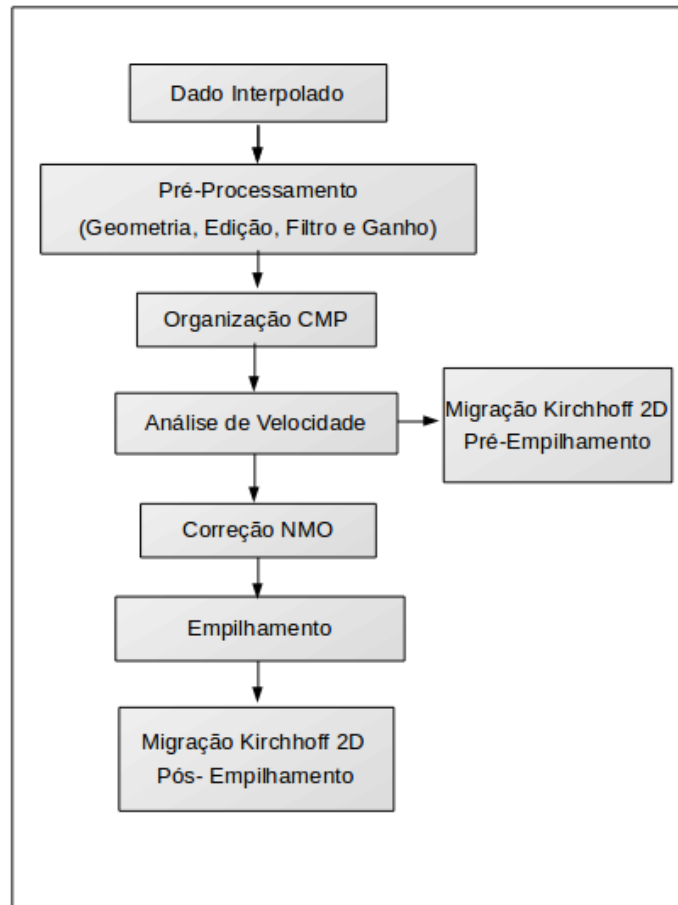


Figura 4.1: Fluxo de processamento aplicado nos dados GPR multi-offset.

Todo o processamento foi realizado utilizando-se o software ProMAX® desenvolvido pela Landmark Graphics Corporation. Este aplicativo dispõe de ferramentas que organizam fluxogramas contendo todos os processos desejados para cada etapa do processamento.

4.1 GEOMETRIA

A primeira etapa depois de carregado o dado GPR dentro do PROMAX, foi definir corretamente a geometria dentro de uma database, a partir de informações relativas às posições (coordenadas) de fonte e do arranjo de receptores. A geometria permite associar o traço ao local amostrado e desta forma definir as coordenadas do ponto médio comum, do afastamento entre fonte e receptor, além de outras informações relevantes, que possibilitem a organização dos traços em famílias; CDP, tiro comum, receptores comum, afastamento comum dentre outras formas possíveis de organização.

4.2 EDIÇÃO DE DADOS

Dando continuidade ao fluxo de processamento, foi realizada a edição de traços. Nesta etapa, é feita uma análise por toda a seção, com objetivo de eliminar de forma parcial ou total traços que possam comprometer a qualidade do resultado desejado.

Os principais traços editados num radargrama são: traços com baixíssima relação sinal-ruído, que podem ser devido ao desligamento ou problemas no receptor; traços com polaridade invertida; traços com ruídos aleatórios diretamente relacionados a sinais transientes, etc (Yilmaz, 2001).

Para melhorar os resultados, foram silenciados (mute) os 15 primeiros canais, pois apresentaram problemas de descontinuidade dos eventos, quando geradas seções no domínio de família de afastamento comum (*common-offset gather*), conforme mostra a Figura 4.2. O painel à esquerda corresponde a seção de afastamento comum do receptor 1 e o painel à esquerda a seção de afastamento comum do receptor 16.

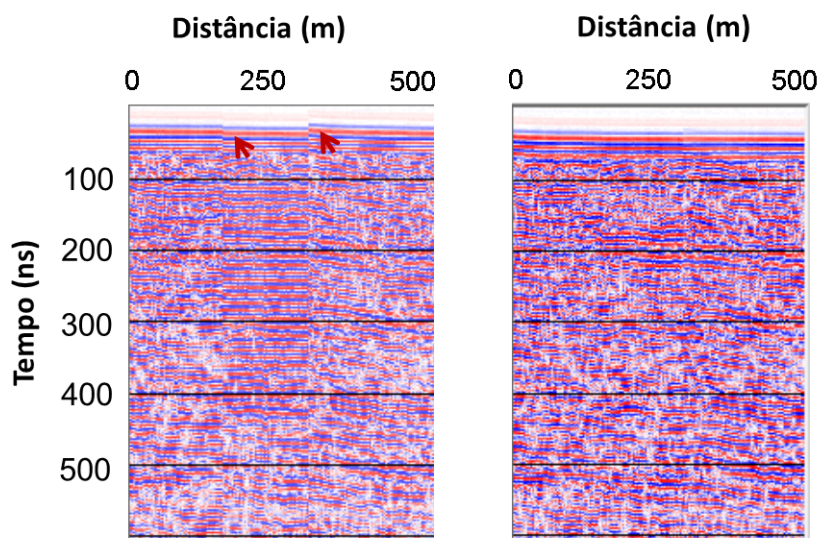


Figura 4.2: Painel à esquerda mostra seção de afastamento comum receptor 1. Painel à direita mostra a seção de afastamento comum de receptor 16

4.3 FILTROS E GANHOS

O filtro passa-banda é bastante aplicado no processamento de dados. Ele pode ser aplicado em diferentes estágios do fluxograma de processamento. É utilizado tanto para remover ruídos que contém baixa frequência como de alta frequência, e assim preservar o resto do conteúdo de frequência considerada dominante e representativa de sinal, que se apresenta no intervalo de 50 MHz e 140 MHz. Este filtro é definido por quatro componentes de frequência. São eles: frequência baixa de corte; frequência baixa de passagem; frequência alta de passagem; e frequência alta de corte. Essas quatro frequências definem o filtro passa-banda como um trapezoide (Yilmaz, 2001).

Para os dados deste trabalho utilizou-se o filtro passa-banda com frequências 10 MHz, 30 MHz, 160 MHz e 200 MHz. A Figura 4.3 , mostra (a) o dado antes da aplicação do filtro passa-banda. (b) o dado filtrado. Em ambas as seções destacou-se as mesmas regiões para compararmos os resultados, no zoom mostrado em cada uma delas é possível observar uma melhora nos eventos do dado filtrado, pois se encontram mais bem delineados.

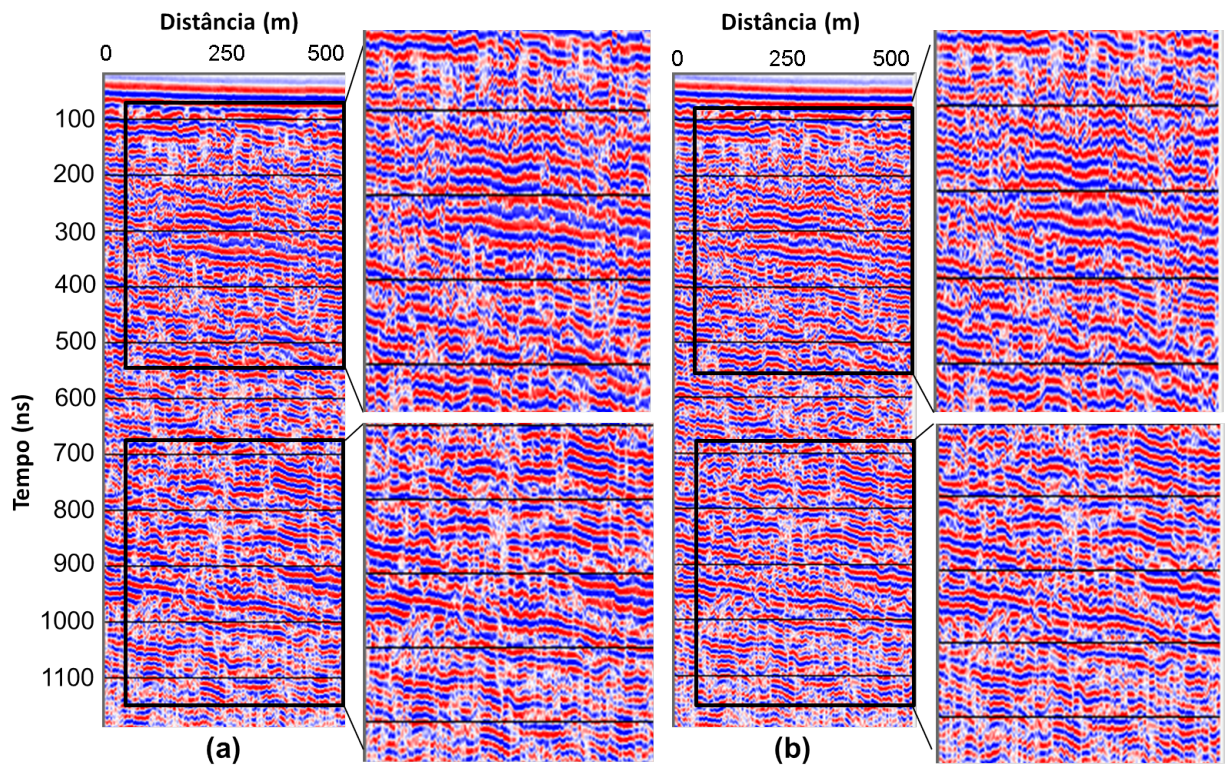


Figura 4.3: Seção de GPR multi-offset organizado em afastamento mínimo (a) dado sem filtro. (b) dado filtrado

Em todas as seções do presente trabalho foi usado o Controle de Ganho Automático (AGC), processo pelo qual o ganho do sistema é variado na razão inversa da amplitude média dos dados de entrada, de modo a manter a amplitude média dos dados de saída aproximadamente constante. A atuação do ganho em pequenas janelas de tempo causa uma melhor distribuição das amplitudes; quanto maior for a janela, menor será o efeito. No trabalho foi utilizada uma janela de tempo de 300 ns no AGC, o que resultou em melhores resultados.

4.4 ANÁLISE DE VELOCIDADE

A análise de velocidade é uma etapa diretamente ligada ao êxito do processamento, uma vez que a qualidade da seção empilhada e de outros processos como a migração dependem do grau de precisão alcançado na determinação das velocidades das camadas

em subsuperfície Yilmaz (2001).

Nesta etapa, os traços da seção são reorganizados em família CMP, que representam as reflexões referentes a um mesmo ponto de profundidade, na qual se diferenciam pelo o atraso no tempo de chegada, devido aos diferentes afastamentos entre fonte e receptor (offset). A curva do tempos de trânsito em função do afastamento fonte-receptor é descrito por uma hipérbole, dada por:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{NMO}^2} \quad (4.1)$$

Onde t é o tempo que a onda leva para fazer a trajetória da fonte até a camada refletora e depois da camada refletora até o receptor (*tempo de trânsito*), t_0 , o tempo duplo da trajetória da onda com incidência normal no refletor no afastamento nulo (simulando fonte e receptor no mesm lugar), x afastamento entre a fonte e o receptor e v é a velocidade da camada acima do refletor.

Considerando um meio composto por camadas horizontais, a velocidade normal move-out (NMO) é equivalente à velocidade RMS¹ (v_{rms}). Cada camada tem um certa espessura que pode ser definida em termos do tempo de trânsito duplo, no afastamento nulo ($x=0$). As camadas tem velocidades intervalares (v_1, v_2, \dots, v_n), onde n é número de camadas. A velocidade RMS abaixo do refletor onde se situa o ponto D é definida como:

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta\tau_i \quad (4.2)$$

Onde $\Delta\tau_i$ é o tempo duplo vetical da i -ésima camada e t_0 é dado por:

$$t_0 = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_i \quad (4.3)$$

Para afastamentos pequenos, comparados com a profundidade, a série pode ser truncada, se tornando:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{rms}^2} \quad (4.4)$$

Visto isto, esta etapa consiste em encontrar velocidades que corrijam os deslocamentos causados pelos diferentes afastamentos fonte-receptor, obtendo como resultado uma primeira aproximação para as velocidades reais de subsuperfície, considerando que para pequenos offsets, as velocidades NMO e de empilhamento são aproximadamente iguais à velocidade RMS.

A estimativa da velocidade NMO sobre as famílias CDP's utiliza o espectro de velocidade determinado por medidas de coerência Yilmaz (2001). Uma das maneiras de

¹root mean square

quantificar a coerência é através do semblance. O semblance representa uma medida da razão entre a energia do sinal sísmico após o somatório dos traços e a energia de todos os traços envolvidos no somatório. Sua equação é:

$$S = \sum_t \frac{\left(\sum_{i=1}^M U_{i,t(i)}^2 \right)}{M \sum_t \sum_{i=1}^M U_{i,t(i)}^2} \quad (4.5)$$

Onde , $U_{i,t(i)}$ é a amplitude do sinal indexado pelo o numero de traços, $i = 1, \dots, M$ e a função é normalizada no intervalo $[0, 1]$.

No Promax, a etapa de análise de velocidade ou picking de velocidade é realizado em um ambiente de trabalho interativo conforme Figura 4.4, que permite combinar dois métodos de análise de velocidades em um único ambiente.

O primeiro está baseado no espectro de velocidades que utiliza o mapa de coerência (Figura 4.4(a)), na qual são realizados os *picking* de velocidades baseado nos pontos (V_{NMO}, t) de maior amplitude, ou seja, maior coerência que através da Equação 4.1, geram hiperboles que melhor se ajustam aos eventos de reflexão visualizados nas superfamílias CMP (Figura 4.4(b)), essas superfamílias são grupos de 7 famílias CMP que são empilhados em função do tempo e deslocamento em intervalos de 50 CDPs que iniciou do CDP 300 ao CDP 1900 (maior cobertura) , com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído e melhorar a coerência do painel semblance. A resposta ao empilhamento da seção pode ser visualizado no painel do empilhamento dinâmico (Figura 4.4(c))

O segundo método, denominado Empilhamento de Velocidade Constante (CVS), consiste em aplicar uma série de velocidades constantes, V_{stack} , no empilhamento em um grupo de CMPs. Os resultados produzidos por cada velocidade são mostrados um ao lado do outro, como ilustrado na Figura 4.4 (d). As velocidades de empilhamento são estimadas com base na amplitude e na continuidade do evento empilhado e, posteriormente, é escolhida a velocidade que produz a melhor resposta do empilhamento para um evento selecionado.

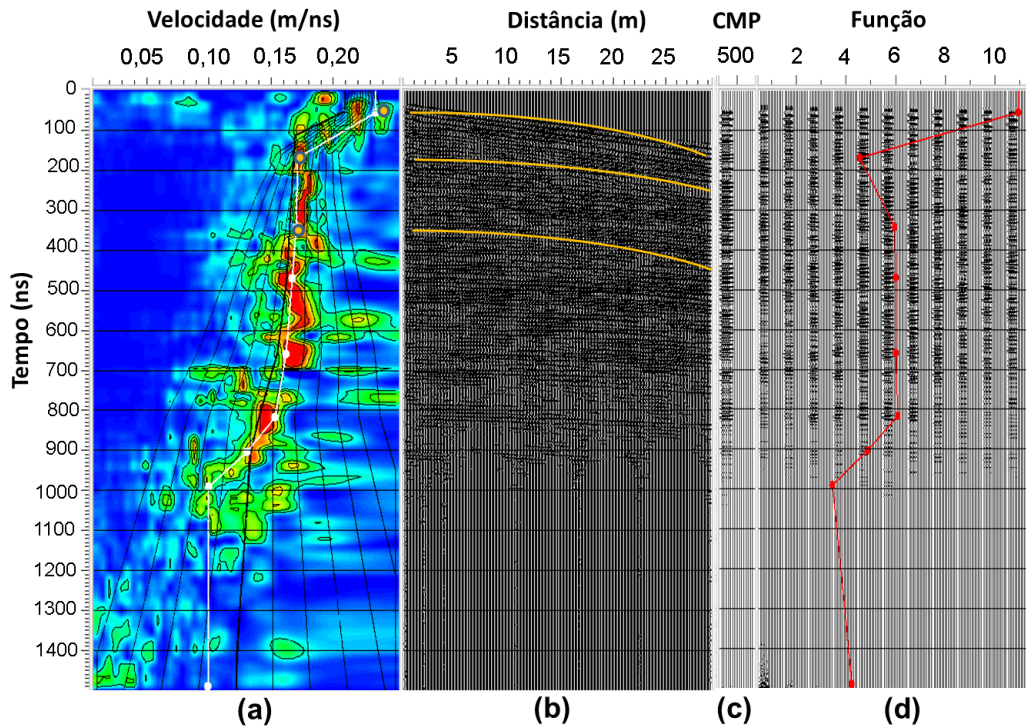


Figura 4.4: Análise de velocidade formado por 3 painéis interativos, à esquerda painel semblance com os picking de velocidades, ao meio a seção CMP seguido pelo o empilhamento dinâmico e à direita o painel CVS (Common Velocity Stack: vários CMPs são corrigidos por NMO e empilhados a uma velocidade constante

Os *picking* de velocidade para cada família CMP apresentaram um range de velocidades de 0,23 a 0,12 m/ns, a função velocidade calculadas para cada CMP são interpoladas para gerar um modelo de velocidade RMS 2D, conforme mostra o painel à esquerda da Figura 4.5.

4.5 CORREÇÃO NMO

A correção NMO é o processo responsável pela compensação do atraso nos tempos de chegada dos traços (para um mesmo evento sísmico) que é causado pela diferença de distância entre pares de fonte-receptor. A correção é feita no domínio dos CDPs através da aplicação das velocidades obtidas nas análises de velocidades usando a expressão de tempo de trânsito hiperbólico da reflexão da Equação 4.1. Uma vez que o tempo de um evento (t) é obtido se faz a correção para levar ao tempo da incidência normal mediante aplicação da Equação 4.6 ou 4.7 , descritas abaixo por:

$$\Delta t_{nmo} = t - t_0 \quad (4.6)$$

ou ainda,

$$\Delta t_{nmo} = t_0 - \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{v_{nmo} t_0} \right)^2} - 1 \right] \quad (4.7)$$

Onde t_0 tempo de percurso de um raio refletido verticalmente.

4.6 EMPILHAMENTO

Após a aplicação da correção NMO utilizando as velocidades escolhidas, foi realizado o empilhamento dos CMPs. O empilhamento no domínio “ponto médio comum” é realizado pela soma dos traços, corrigidos de NMO, de uma família CMP. Idealmente, o resultado é uma aproximação da seção de afastamento nulo ou zero-offset, em que as reflexões, associadas aos refletores horizontais, equivalem a um mesmo ponto em subsuperfície. Vale lembrar que, para uma interface com mergulho, as reflexões não provêm de pontos de reflexão exatamente abaixo do CMP (Yilmaz, 2001).

A seção criada pelos traços empilhados é denominada seção CMP empilhada. Esse processo melhora a relação sinal-ruído do dado, visto que a energia somada em fase contribui construtivamente em eventos coerentes, reforçando o sinal como no caso de reflexões primárias, reflexões múltiplas e difrações, enquanto que o ruído aleatório, quando somado, atenua-se, essa é a principal vantagem do empilhamento.

Entretanto, apesar do empilhamento CMP ser utilizado extensivamente para simular seções de afastamento nulo com um mínimo de esforço computacional, ele requer o conhecimento do modelo de velocidades para computar os tempos de correção NMO. Logo, um bom macro-modelo de velocidades e uma excelente correção de NMO dá origem a uma seção empilhada de qualidade.

A Figura 4.5, mostra o resultado da seção CMP empilhada (painel à direita), na qual nota-se um enorme ganho de qualidade da imagem, sendo possível distinguir melhor os eventos sugeridos pois se apresentam mais realçados e com continuidade lateral e possibilitando assim a interpretação de eventos antes indefinidos, como o caso do evento H.

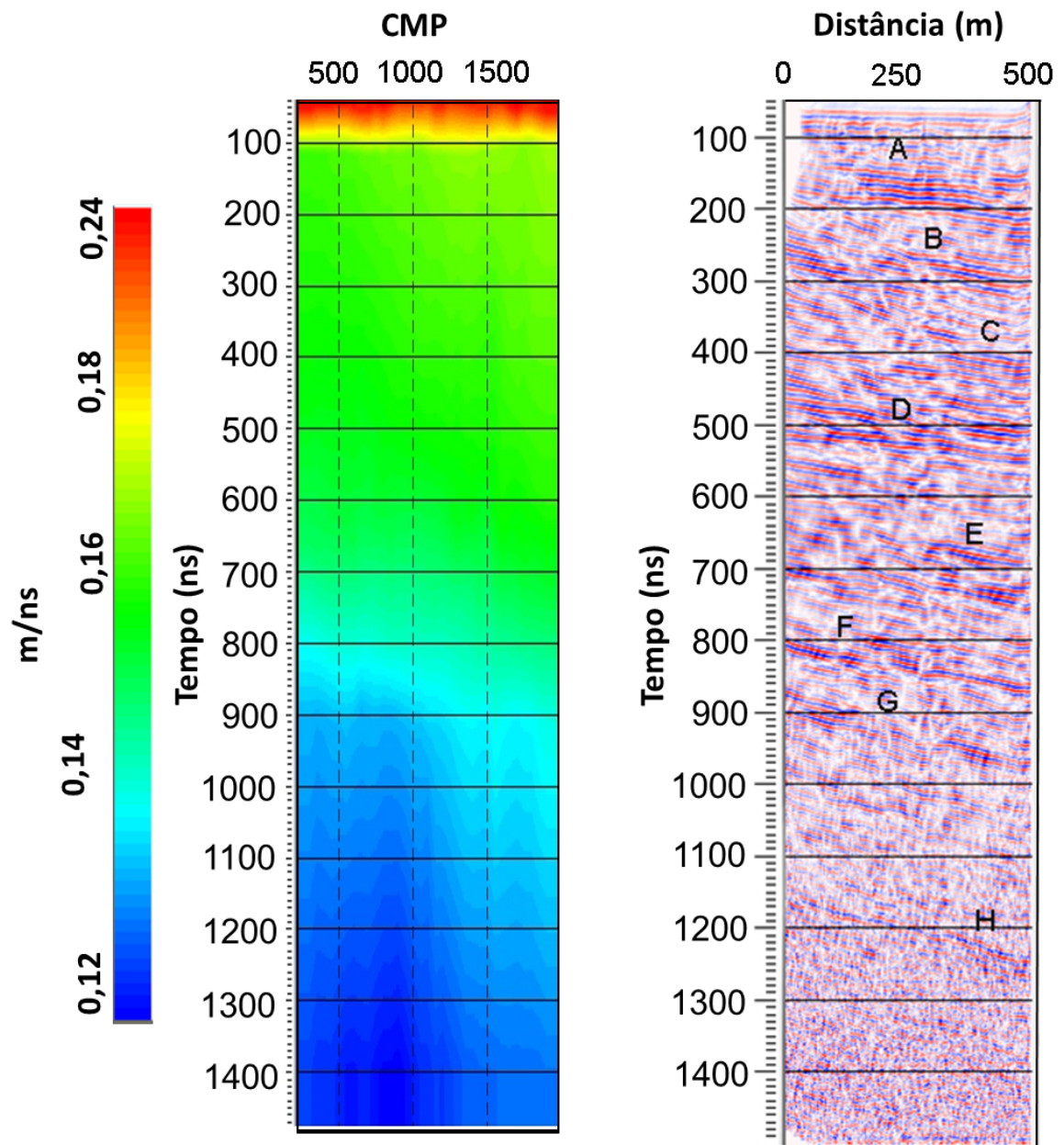


Figura 4.5: Painel à esquerda mostra o modelo de velocidade RMS 2D. Painel à direita mostra o resultado do processo de empilhamento - seção CMP empilhada

4.7 MIGRAÇÃO

A migração é um método crescente e extremamente vantajoso no processamento de dados. A melhoria da resolução lateral, visto o reposicionamento dos refletores, a focalização da energia espalhada, e a correção de amplitude proporcionada pelos operadores de migração são umas das vantagens deste método (Yilmaz, 2001).

Neste trabalho foi utilizada a migração Kirchhoff que considera uma reflexão primária como sendo formada pelo envelope de todas as curvas de difrações oriundas de pontos difratores posicionados sobre o respectivo refletor. Realizando o empilhamento de amplitudes e com base no Princípio de Huygens, a migração de Kirchhoff produz valores de amplitude onde o ponto em estudo está sobre um refletor. Deste modo, não há necessidade de um prévio conhecimento das reflexões, apenas deve-se ter um campo de velocidade que represente razoavelmente a distribuição espacial das velocidades na subsuperfície para o cálculo das curvas de difração. Mais detalhes sobre o fundamento teórico do método mencionado (Schneider, 1978; Robinson, 1983; Stolt and Benson, 1991; Claerbout, 1993; Zhao, 1996; Leparoux et al., 2001; Yilmaz, 2001).

Baseado nesse método, foram aplicadas a migração Kirchhoff 2D pré-empilhamento e a pós-empilhamento no domínio no tempo, ambas utilizam-se o modelo de velocidade RMS e o tempo duplo de reflexão.

A migração Kirchhoff pré-empilhamento é a designação dada ao método de migração de Kirchhoff aplicada em seções pré-empilhadas quando esta migração está baseada na configuração de afastamento comum, ou seja, a migração pré-empilhamento pode ser considerada como um desenvolvimento da técnica pós-empilhamento considerando o afastamento não-nulo. Para tal, cada traço sísmico de uma seção de afastamento comum (*Common Offset*) é individualizado pelo valor da coordenada de ponto médio. Deste modo, a curva de tempos de difração para o ponto em uma seção afastamento comum é traçada variando-se as coordenadas dos pontos médios. Sobre esta curva são reunidas as amostras que são somadas e o resultado atribuído ao ponto difrator em subsuperfície da seção de saída.

A migração pré-empilhamento é mais ambiciosa que a migração pós-empilhamento, mas também exige um maior custo operacional, uma vez que o procedimento é feito para cada seção no domínio do tiro. Por outro lado, realizando-se a soma dos traços referentes à mesma posição se obtém uma melhor relação sinal ruído além de apresentar uma maior fidelidade no reposicionamento dos refletores.

A migração pós-empilhamento é geralmente empregada nas seções empilhadas de afastamento nulo. Nesta configuração, fonte e receptor estão localizados na mesma posição espacial. A migração em tempo coloca a amplitude migrada no ápice da hipérbole, correspondente ao tempo de trânsito do raio vertical (raio imagem) associado ao ponto difrator. Com isso, o operador de migração realiza o somatório de todas as amostras registradas

intersectadas pela hipérbole de difração, resultando no valor migrado no ponto considerado. Repetindo este processo para todas as amostras de todos os traços, obtêm-se a seção migrada final.

Os resultados das duas técnicas de migrações Kirchhoff (pré e pós-empilhamento) em tempo são apresentados na Figura 4.6. As duas seções migradas apresentam uma boa relação sinal-ruído, principalmente nos eventos que ocorrem em tempo > 1000 ns.

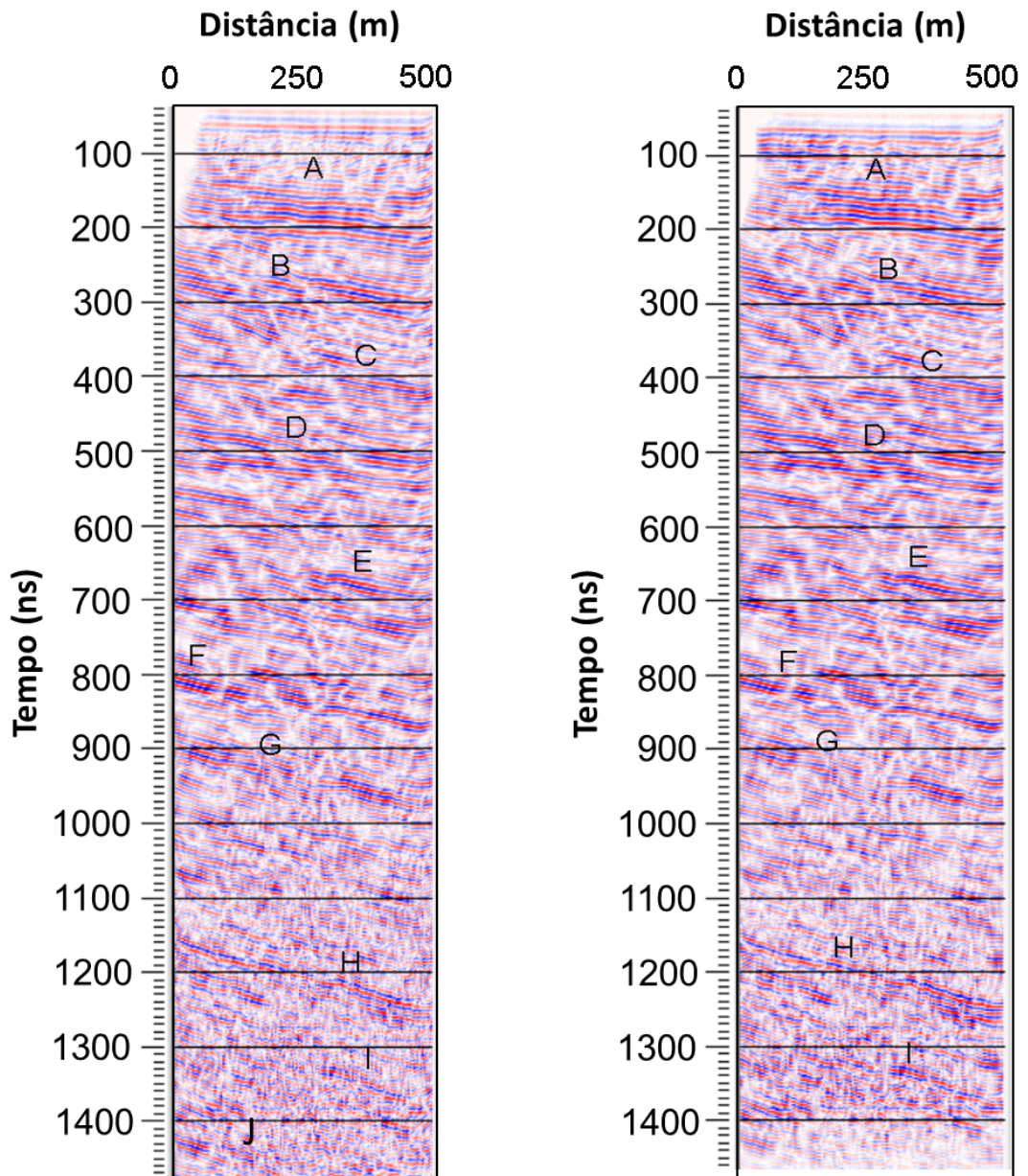


Figura 4.6: Painel à esquerda mostra a seção migrada pré-empilhamento 2D em tempo. Painel à direita mostra a seção migrada pós-empilhamento 2D em tempo.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Apesar da baixa qualidade e da baixa cobertura dos dados FO_{Off_0} em virtude da aquisição ter sido realizada por tração de moto, obtendo menos pontos de amostragem espacial, este dado serviu como parâmetro para analisar a coerência nos eventos e a qualidade nos dados GPR multi-offset interpolados, Off_{min} .

Os eventos A, B, C e D ocorreram em tempos similares em ambas as seções, além disso a seção interpolada Off_{min} obteve uma melhor relação sinal-ruído, os eventos que foram delineados fracamente e ou simplesmente sugerido antes na seção FO_{Off_0} , agora aparecem mais realçados, mais contínuos e ricos em detalhes na seção, conforme podemos observar os eventos A, B, C, D e E, destacados na Figura 3.4. Além disso ocorreu um aumento no alcance do sinal na escala do tempo, a seção FO_{Off_0} mostra uma atenuação de sinal a partir do tempo de 800 ns, enquanto que na seção de Off_{min} revela eventos interpretáveis para o tempo de 1000 ns, como podemos observar através dos eventos F e G. Enquanto que o evento S se caracteriza por um artefato, que cruza os dois possíveis refletores F e G.

Para melhorar a visualização dos eventos, foi aplicado a etapa de processamento avançado nos dados GPR multi-offset. Nesta etapa foi gerado como resultado, um modelo de velocidade RMS 2D que se mostrou coerente em relação à análise de velocidade, uma vez que se espera que as velocidades calculadas a partir das amplitudes do painel *semblance* apresentem um valor médio próximo à velocidade no gelo $v_{gelo} = 0,16m/ns$ e uma tendência decrescente para profundidades crescentes, conforme mostra o painel à esquerda da Figura 4.5, pois ao contrário da onda elástica, a velocidade da onda eletromagnética geralmente decresce com a profundidade, pois existe uma tendência das camadas mais profundas se encontrarem mais compactadas, contendo menores volumes de ar, o que aumenta o valor da constante dielétrica.

A boa estimativa no modelo de velocidade RMS reflete, após a correção NMO, em uma seção CMP empilhada (Figura 4.5), na qual os eventos se encontram mais realçados quando comparado à seção Off_{min} interpolada, Figura 3.4 (c). A melhora na relação sinal-ruído pode ser observada em toda a seção, na qual podemos destacar o refletor A, que na seção Off_{min} interpolada se encontrava com bastante ruído. Nos refletores D, F e G podemos observar como resultado do empilhamento, uma melhora na continuidade lateral, além da supressão de ruídos, como o artefato (evento S) que aparecia na seção interpolada Off_{min} e que tornou os eventos mais facilmente identificáveis. Além disso, na seção CMP empilhada mostra o aparecimento de eventos reflexivos em tempo > 1000 ns, que não apareciam na seção Off_{min} interpolada por conta de sua baixa relação sinal ruído, como podemos observar no refletor H que começa a partir do tempo de 1200 ns.

Na ultima etapa do processamento, excelentes resultados foram obtidos pela migração

Kirchhoff Pré-empilhamento e Pós-empilhamento em tempo, respectivamente conforme Figura 4.6) as seções se mostraram parecidas com os eventos com uma maior continuidade lateral e melhor resolução quando comparada a seção CMP empilhada, em destaque para tempos > 1000 ns, como observado eventos H e I.

Quando comparamos as seções migradas em tempo, o método Kirchhoff Pré-empilhamento é que apresenta melhores resultados. Os eventos registrados com tempo > 1000 ns, apresentam-se mais bem definidos e com uma melhor relação sinal ruído. Além disso, foi possível a visualização de eventos mais profundos como o destacado com a letra J, registrado em um tempo de aproximadamente 1400 ns. Isto pode estar associado à dificuldade encontrada em obter um modelo de velocidades preciso, devido à baixa qualidade do dado e as mudanças laterais de velocidades. Este resultado, aparentemente incomum, é habitual para dados terrestres, onde se torna muito complexo e oneroso obter com precisão um modelo com as informações sobre a distribuição das velocidades em subsuperfície.

Dessa forma, ficou bastante visível a eficiência do fluxo de procesamento avançado aplicado nos dados GPR multi-offset, onde foi possível uma recuperação muito boa na continuidade dos eventos. Além disso, houve um aumento na amplitude nos eventos de interesse e atenuação de ruídos, contribuindo para a melhora na relação sinal/ruído da seção. É importante ressaltar que a seção migrada pré-empilhada em tempo foi a seção de melhor resultado, realçando melhor os eventos, em destaque para os de tempo > 1000 ns que não eram visíveis na seção GPR interpolada, *Offmin*.

REFERÊNCIAS

- Abma, R., and J. Claerbout, 1995, Lateral prediction for noise attenuation by tx and fx techniques: *Geophysics*, **60**, 1887–1896.
- Abma, R., and N. Kabir, 2005, Comparison of interpolation methods: The Leading Edge - SEG, **24**, 961–1080.
- Annan, A., 2003, Ground penetrating radar principles, procedures and applications: Sensors and Software, Mississauga, Ont., Canada.
- Bardan, V., 1987, Trace interpolation in seismic data processing: *Geophysics Prospecting*, **35**, 343–358.
- Benson, A., 1995, Applications of ground penetrating radar in accessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, fault, cavities.: *Journal of Applied Geophysics*, **33**, 177–193.
- Berard, B., and J. Maillol, 2007, Multi-offset ground penetrating radar data for improved imaging in areas of lateral complexity – application at a native american site: *Journal of Applied Geophysics*, **62**, 167–177.
- Bradford, J., 2008, Measuring water content heterogeneity using multifold gpr with reflection tomography.: *Vadose Zone Journal*, **7**, 184–193.
- Bradford, J., J. Nichols, M. T. D., and J. T. Harper, 2009, Continuous profiles of electromagnetic wave velocity and water content in glaciers: an example from bench glacier, alaska, usa.: *Annals of Glaciology*, **50**, 1–9.
- Chen, Z., L. Zhang, and L. Mo, 2015, Seismic data interpolation using nonlinear shaping regularization.: *Journal of Seismic Exploration*, **25**, 1–9.
- Claerbout, J. F., 1993, Basic earth imaging: Stanford: Exploration Project.
- Curry, W., 1999, Interpolation with multi-shifted-scale prediction-error filters: SEG Technical Program Expanded Abstracts, **23**.
- Dobrin, M. B., 1988, Introduction to geophysical prospecting, 3 ed. ed.: New York: MacGrawHill.
- Fisher, E., A. McMechan, and P. Annan, 1992, Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data: *Geophysics*, **57**, 495–504.
- Fomel, S., 2007, Shaping regularization in geophysical-estimation problems.: *Geophysics*, **72**, 1MA–Z35.
- , 2009, Adaptive multiple subtraction using regularized nonstationary regression.: *Geophysics*, **74**, 1JF–Z17.
- Forte, E., M. Dossi, M. Pipan, and R. Colucci, 2014, Velocity analysis from common offset gpr data inversion: theory and application to synthetic and real data: *Geophysical Journal International*, **197**, 471–1483.
- Forte, E., and M. Pipan, 2016, Review of multi-offset gpr applications: Data acquisition, processing and analysis.: *Signal Processing*, **132**, 210–220.

- Gerhards, H., U. Wollschläger, Q. Yu, P. Schiwek, P. Pan, and K. Roth, 2008, Continuous and simultaneous measurement of reflector depth and average soil-water content with multichannel ground-penetrating radar: *Geophysics*, **73**, 1JA–Z66.
- Grasmueck, M., R. Weger, and H. Horstmeyer, 2005, Full-resolution 3d gpr imaging: *Geophysics*, **70**, 12JF–Z26.
- Greaves, R., D. Lesmer, J. Lee, and M. Toksoz, 1996, Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground penetrating radar: *Geophysics*, **61**, 627–933.
- Hermance, J., 2001, Ground penetrating radar: Post migration stacking of n-fold common midpoint profile data.: *Geophysics*, **66**, 372–698.
- Kabir, N., and D. Verschuur, 2006, Restoration of missing offsets by parabolic radon transformation: *Geophysical Prospecting*, **43**, 347 – 368.
- Larner, K., B. Gibson, and D. Rothman, 1981, Trace interpolation and the design of seismic surveys.: *Geophysics*, **46**, 407–409.
- Leparoux, D., D. Gibert, and P. Côte, 2001, Adaptation of prestack migration to multi-offset groundpenetrating radar (gpr) data: *Geophysical Prospecting*, **49**, 374–386.
- Linner, C., 1999, *Elements of 3-d seimology*: Tulsa, PennWell.
- Liu, B., and M. Sacchi, 2004, Minimum weighted norm interpolation of seismic records: *Geophysics*, **69**, 1372–1570.
- Liu, Y., and S. Fomel, 2011, Seismic data interpolation beyond aliasing using regularized nonstationary autoregression: *Geophysics*, **76**, V69–V77.
- Martins, S. and Travassos, J., E. Gomes, and W. Mansur, 2016, A transgressive sedimentary sequence assessment by multi–offset gpr data.: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*, 2469–2473.
- Martins, S., 2013, *Investigações geofísicas no continente antártico*: PhD thesis, Observatório Nacional - ON.
- Martins, S., and J. Travassos, 2015, Interpolating wide-aperture groundpenetrating radar beyond aliasing.: *Geophysics*, **80**, H13–H22.
- Naghizadeh, M., and M. Sacchi, 2009, f-x adaptive seismic-trace interpolation: *Geophysics*, **74**, V9–V16.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress.: *Earth-Science Reviews*, **66**, 261–330.
- Pipan, M., L. Baradello, E. Forte, P. A., and I. Finneti, 1999, 2d and 3d processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site.: *Applied Geophysics*, **41**, 271–292.
- Porsani, M., 1999, Seismic trace interpolation using half-step prediction filters: *Geophysics*, **64**, 1347–1656.
- Robinson, E., 1983, *Migration of geophysical data*: International Human Resources Development Corporation, Boston.
- Schneider, W., 1978, Integral formulation for migration in two and three dimensions.:

- Geophysics, **43**, 49–76.
- Spitz, S., 1991, Seismic trace interpolation in the f-x domain: Geophysics, **56**, 785–794.
- Stolt, R., and A. Benson, 1991, Seismic migration: Theory and practice: Geophysical Press.
- Strange, A., 2013, Analysis of time interpolation for enhanced resolution gpr data.
- Trad, D., 2009, Five-dimensional interpolation: Recovering from acquisition constraints: Geophysics, **74**, 1ND–Z107.
- Trad, D., T. Ulrych, and M. Sacchi, 2003, Latest views of the sparse radon transform: Geophysics, **68**, 1942–2156.
- Vermeer, G. J. O., 2002, 3-d seismic survey design.: Society of Exploration Geophysicists.
- Wang, J., M. Ng, and M. Perz, 2010, Seismic data interpolation by greedy local radon transform: Geophysics, **75**, 1942–2156.
- Wang, Y., 2002, Latest views of the sparse radon transform: Geophysics, **68**, 1942–2156.
- Yi, L., K. Takahashi, and M. Sato, 2015, A fast iterative interpolation method in f-k domain for 3-d irregularly sampled gpr data: Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, **9**.
- Yilmaz, O., 2001, Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data: Society of Exploration Geophysicists.
- Zhao, P., 1996, An efficient computer program for wave front calculation: Geophysics, **22**, 239–251.
- Zwartjes, P., and A. Gisolf, 2006, Fourier reconstruction of marine-streamer data in four spatial coordinates: Geophysics, **71**, 1ND–Z126.