



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA



ELDIANE BORGES DOS SANTOS DURÃES

Uma implementação da análise de velocidade CMP

Campinas
22/11/2024

ELDIANE BORGES DOS SANTOS DURÃES

Uma implementação da análise de velocidade CMP

Monografia apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para obtenção de créditos na disciplina Projeto Supervisionado, sob a orientação da Profa. Dra. Maria Amélia N. Schleicher e do Prof. Dr. Joerg Schleicher.

Resumo

O presente trabalho trata do estudo e implementação de técnicas de análise de velocidade em sessões CMP. Primeiro, observamos que em subsuperfícies horizontalmente estratificadas e homogêneas, o tempo de trânsito de ondas sísmicas em função do afastamento entre a fonte e o receptor pode ser aproximado por uma hipérbole, conhecida como hipérbole de reflexão. Ao registrar dados sísmicos com fontes e receptores alocados na configuração de ponto médio comum (CMP), tem-se a redundância nos dados que permite observar as hipérbolas de reflexão ainda que os refletores sejam curvos e a velocidade de propagação da onda varie. A partir de tal modelagem matemática, é possível realizar a análise de velocidade da subsuperfície através do espectro de velocidade baseado na semblance, identificando os eventos sísmicos de forma automatizada e aplicando a fórmula de Dix aos resultados obtidos. Os processos descritos anteriormente foram implementados e testados em seções CMP geradas computacionalmente e com variação no nível de ruído. Com isso, constatou-se que o tamanho da janela temporal da semblance deve escolhida conforme o nível de ruído da sessão sísmica, uma vez que esta aumenta a razão sinal/ruído, mas também diminui a resolução vertical da velocidade.

Abstract

This project relates with the study and implementation of velocity analysis techniques in CMP gathers. First, we notice that in horizontally stratified and homogeneous subsurfaces, the travel time of seismic waves as a function of the offset between the source and the receptor can be approximated by a hyperbola, which is known as the reflection hyperbola. When recording seismic data with sources and receptors allocated in the common midpoint (CMP) configuration, the redundancy in the data allows the observation of the reflection hyperbolas even if the reflectors are curved and the wave propagation velocity varies. From such mathematical modeling, it is possible to do the velocity analysis of the subsurface through the semblance-based velocity spectrum, identifying seismic events in an automated manner and applying Dix's formula to the results obtained. The processes described above were implemented and tested in computationally generated CMP gathers with varying noise levels. Thus, it was found that the size of the semblance time window should be chosen according to the noise level of the seismic gather, since it increases the signal/noise ratio, but also reduces the vertical velocity resolution.

Conteúdo

1	Introdução	6
2	O tempo de trânsito e a velocidade RMS	7
3	Seção CMP	11
4	Análise de velocidade	14
4.1	Espectro de velocidade	14
4.1.1	Semblance	15
4.1.2	Identificação dos eventos	17
4.2	Fórmula de Dix	18
4.3	Resultados	19
4.3.1	Seção CMP 1	20
4.3.2	Seção CMP 2	23
4.3.3	Seção CMP 3	28
4.3.4	Seção CMP 4	30
5	Conclusão	36
	Apêndices	39
	Apêndice A Implementações em Python	40

1 Introdução

De acordo com Özdoğan Yilmaz [2000], o método sísmico desempenha um papel proeminente na tentativa de produzir imagens da subsuperfície, como, por exemplo, na busca por hidrocarbonetos, na investigação do solo para construção civil, na arqueologia etc., sendo que a exploração sísmica consiste em três etapas principais: aquisição de dados, processamento e interpretação. A primeira etapa consiste em enviar ondas mecânicas para dentro do interior da terra e registrar o sinal refletido em descontinuidades geológicas. Definimos o tempo de trânsito como o intervalo de tempo entre a geração de ondas sísmicas em uma fonte e o registro dessas ondas, depois de refletidas, em um receptor. Daí, para uma subsuperfície com camadas horizontais e homogêneas, o tempo de trânsito em função do afastamento entre fonte e receptor é aproximado por uma hipérbole, sendo essa aproximação melhor para afastamentos pequenos. A partir da modelagem matemática descrita anteriormente, é possível desenvolver técnicas de processamento dos dados sísmicos adquiridos, como o cálculo do espectro de velocidade e a fórmula de Dix.

Nesse sentido, o presente projeto é voltado ao estudo e implementação de técnicas usadas no processamento de dados sísmicos registrados na configuração de ponto médio comum (CMP) para estimar velocidades de propagação da onda em uma subsuperfície com camadas horizontais e homogêneas. Em especial, o cálculo do espectro de velocidade utilizando a semblance como medida de coerência de sinal associado ao uso da fórmula de Dix. Assim, pretende-se avaliar a performance de tal método em seções CMP geradas computacionalmente, além de analisar a sensibilidade quanto à variação do tamanho da janela temporal presente na semblance e o nível de ruído nas seções CMP através de testes sistemáticos. Contudo, espera-se obter um melhor entendimento das técnicas de processamento de dados sísmicos supramencionadas, bem como uma correlação entre o tamanho da janela temporal da semblance e a qualidade das estimativas conforme o nível de ruído.

Para tanto, na Seção 2, tem-se a dedução da aproximação por uma hipérbole dos dados sísmicos registrados em uma subsuperfície com camadas horizontais e homogêneas. Na Seção 3, a aquisição dos dados sísmicos na configuração CMP e sua

concordância com a modelagem descrita anteriormente é detalhada. Já na Seção 4, as técnicas de análise de velocidade a serem usadas são descritas. Na Seção 4.1, tem-se a descrição do cálculo do espectro de velocidade, bem como a semblance e sua relevância enquanto medida de coerência de sinal, enquanto na Seção 4.2, a fórmula de Dix é deduzida. Finalmente, na Seção 4.3, as técnicas de processamento de dados descritas são aplicadas às seções CMP geradas computacionalmente para análise de performance e validação de hipóteses quanto ao tamanho da janela temporal da semblance e o nível de ruído dos dados.

2 O tempo de trânsito e a velocidade RMS

Considere o modelo de propagação de uma onda bidimensional ao longo de meios homogêneos com dois refletores horizontais representado pela Figura 1.

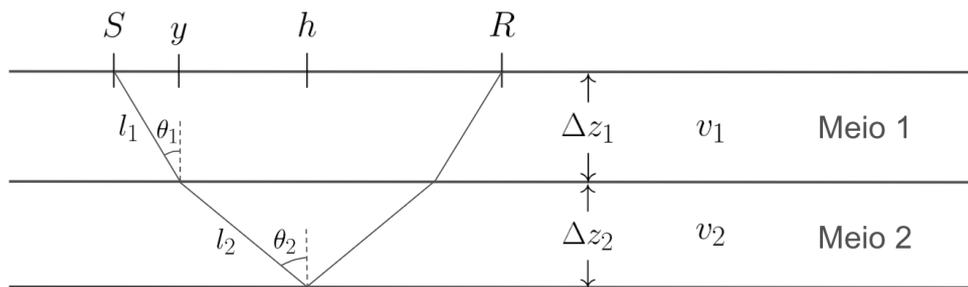


Figura 1: Geometria da propagação de uma onda bidimensional ao longo de camadas horizontais. Fonte: Autora.

Veja que o primeiro meio tem espessura Δz_1 e velocidade de propagação da onda v_1 , enquanto para o segundo meio essas medidas são Δz_2 e v_2 , respectivamente. Note que a onda é gerada na superfície no ponto S, a fonte, e é registrada em R, o receptor. A distância x de S a R é conhecida como afastamento, enquanto h é o meio afastamento, com $x = 2h$. O tempo gasto nessa propagação, isto é, para a onda propagar de S até R, é chamado tempo de trânsito.

Inicialmente, no primeiro meio, a onda percorre uma distância l_1 até encontrar o primeiro refletor, onde incide com ângulo θ_1 , em um tempo de l_1/v_1 . Daí, a onda é transmitida ao segundo meio, percorrendo uma distância l_2 até o segundo refletor, onde incide com ângulo θ_2 , em um tempo de l_2/v_2 . Então, observa-se a reflexão da

onda, a partir da qual tem-se a simetria da propagação da onda em relação ao eixo que é perpendicular às camadas e que passa pelo ponto h . Isso porque, da lei de Snell, o ângulo incidente da onda no segundo refletor é igual ao seu ângulo de reflexão.

Tendo isso em vista, o tempo de trânsito da onda que propaga de S até R , sendo refletida na segunda interface, é dado por

$$t = 2 \left(\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} \right),$$

onde podemos escrever ainda $l_1 = \sqrt{y^2 + \Delta z_1^2}$ e $l_2 = \sqrt{(h-y)^2 + \Delta z_2^2}$, conforme o Teorema de Pitágoras.

Considere a série de Taylor da função $f(w) = \sqrt{1+w}$ ao redor do ponto 0, isto é, $f(w) = f(0) + wf'(0) + O(w^2) \Rightarrow \sqrt{1+w} = 1 + w/2 + O(w^2)$. Daí, para afastamentos pequenos, isto é, quando $x = 2h$ é pequeno em relação à Δz_1 e Δz_2 , podemos escrever as distâncias l_1 e l_2 como

$$\begin{aligned} l_1 &= \Delta z_1 \sqrt{1 + \frac{y^2}{\Delta z_1^2}} = \Delta z_1 \left(1 + \frac{y^2}{2\Delta z_1^2} \right) + O(h^4), \\ l_2 &= \Delta z_2 \sqrt{1 + \frac{(h-y)^2}{\Delta z_2^2}} = \Delta z_2 \left(1 + \frac{(h-y)^2}{2\Delta z_2^2} \right) + O(h^4). \end{aligned}$$

Assim, temos que

$$\begin{aligned} \frac{t}{2} &= \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} \\ &= \frac{\Delta z_1}{v_1} \left(1 + \frac{y^2}{2\Delta z_1^2} \right) + \frac{\Delta z_2}{v_2} \left(1 + \frac{(h-y)^2}{2\Delta z_2^2} \right) + O(h^4) \\ &= \frac{\Delta z_1}{v_1} + \frac{y^2}{2v_1\Delta z_1} + \frac{\Delta z_2}{v_2} + \frac{(h-y)^2}{2v_2\Delta z_2} + O(h^4). \end{aligned}$$

Seja Δt_i o tempo de propagação da onda que se propaga verticalmente ao longo da i -ésima camada, isto é

$$\Delta t_i := \frac{\Delta z_i}{v_i}. \quad (1)$$

Daí, temos que o tempo de trânsito da onda que se propaga na direção vertical, ou seja, em afastamento nulo ($x = 0$) até o n -ésimo refletor e retorna à superfície, $t_{0,n}$, é dado

por

$$\frac{t_{0,n}}{2} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{v_i}, \quad (2)$$

e podemos escrever

$$\frac{t}{2} = \frac{t_{0,2}}{2} + \frac{y^2}{2v_1\Delta z_1} + \frac{(h-y)^2}{2v_2\Delta z_2} + O(h^4). \quad (3)$$

Afim de tirar a dependência em y da equação 3, partindo da Lei de Snell e da geometria da Figura 1, note que

$$\begin{aligned} \frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} &= \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \Rightarrow \frac{y}{v_1 l_1} = \frac{h-y}{v_2 l_2} \Rightarrow \frac{y}{v_1 l_1} + \frac{y}{v_2 l_2} = \frac{h}{v_2 l_2} \\ &\Rightarrow \frac{(v_2 l_2 + v_1 l_1)y}{(v_1 l_1)(v_2 l_2)} = \frac{h}{v_2 l_2} \Rightarrow y = \left(\frac{v_1 l_1}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right) h. \end{aligned}$$

Nesse sentido, segue ainda que

$$h - y = \left(\frac{v_2 l_2}{v_1 l_1} \right) y = \left(\frac{v_2 l_2}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right) h.$$

Substituindo os resultados anteriores na equação 3, obtemos

$$\frac{t}{2} = \frac{t_{0,2}}{2} + \left[\frac{1}{2v_1\Delta z_1} \left(\frac{v_1 l_1}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right)^2 + \frac{1}{2v_2\Delta z_2} \left(\frac{v_2 l_2}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right)^2 \right] h^2 + O(h^4).$$

Podemos denotar ainda

$$\alpha(h) = \frac{1}{2v_1\Delta z_1} \left(\frac{v_1 l_1}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right)^2 + \frac{1}{2v_2\Delta z_2} \left(\frac{v_2 l_2}{v_1 l_1 + v_2 l_2} \right)^2,$$

onde a dependência de α em h decorre das definições de l_1 e l_2 . Com isso, obtemos o tempo de trânsito t da onda bidimensional que se propaga conforme a Figura 1 definido por

$$\frac{t}{2} = \frac{t_{0,2}}{2} + \alpha(h)h^2 + O(h^4). \quad (4)$$

Observe que se elevarmos a equação 4 ao quadrado, segue que

$$\begin{aligned}\frac{t^2}{4} &= \left(\frac{t_{0,2}}{2} + \alpha(h)h^2 \right)^2 + O(h^4) \\ &= \frac{t_{0,2}^2}{4} + t_{0,2}\alpha(h)h^2 + \alpha(h)^2h^4 + O(h^4) \\ &= \frac{t_{0,2}^2}{4} + t_{0,2}\alpha(h)h^2 + O(h^4).\end{aligned}$$

Veja que quando o meio afastamento h tende a 0, temos que as distâncias l_1 e l_2 tendem à espessura das respectivas camadas, isto é, Δz_1 e Δz_2 , respectivamente. Assim, calculamos o limite do coeficiente $t_{0,2}\alpha(h)$ da equação anterior quando h tende a 0 conforme abaixo

$$\begin{aligned}\lim_{h \rightarrow 0} t_{0,2}\alpha(h) &= \lim_{h \rightarrow 0} t_{0,2} \left[\frac{1}{2v_1\Delta z_1} \left(\frac{v_1l_1}{v_1l_1 + v_2l_2} \right)^2 + \frac{1}{2v_2\Delta z_2} \left(\frac{v_2l_2}{v_1l_1 + v_2l_2} \right)^2 \right] \\ &= t_{0,2} \left[\frac{1}{2v_1\Delta z_1} \left(\frac{v_1\Delta z_1}{v_1\Delta z_1 + v_2\Delta z_2} \right)^2 + \frac{1}{2v_2\Delta z_2} \left(\frac{v_2\Delta z_2}{v_1\Delta z_1 + v_2\Delta z_2} \right)^2 \right] \\ &= \frac{t_{0,2}}{2} \frac{v_1\Delta z_1 + v_2\Delta z_2}{(v_1\Delta z_1 + v_2\Delta z_2)^2} \\ &= \frac{t_{0,2}/2}{v_1\Delta z_1 + v_2\Delta z_2} \\ &= \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{v_1^2\Delta t_1 + v_2^2\Delta t_2},\end{aligned}$$

onde na última passagem utilizou-se as equações 1 e 2. Aqui, definimos a velocidade Root Mean Square (RMS) do segundo refletor, $v_{RMS,2}$, como

$$\lim_{h \rightarrow 0} t_{0,2}\alpha =: \frac{1}{v_{RMS,2}^2}.$$

Finalmente, para afastamentos pequenos, isto é, quando x é pequeno em relação à Δz_1 e Δz_2 , temos que o tempo de trânsito t é aproximado por

$$\frac{t^2}{4} \approx \frac{t_{0,2}^2}{4} + \frac{h^2}{v_{RMS,2}^2}.$$

Nesse sentido, podemos ainda generalizar o resultado anterior para o caso

de uma subsuperfície com n camadas horizontais e homogêneas. Ao definir a velocidade Root Mean Square (RMS) do n -ésimo refletor, $v_{RMS,n}$, como

$$v_{RMS,n}^2 := \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (5)$$

segue que, em pequenos afastamentos, o tempo de trânsito t da onda bidimensional que é refletida na n -ésima camada pode ser aproximado por

$$t^2 \approx t_{0,n}^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS,n}^2}. \quad (6)$$

Note que a equação 6 indica que o gráfico do tempo de trânsito t em função do meio afastamento h se aproxima de uma hipérbole, a qual é conhecida como hipérbole de reflexão. Uma vez obtidas as aproximações dos coeficientes dessa equação, é possível estimar $t_{0,n}$ e $v_{RMS,n}$, de modo a conhecer as velocidades e profundidades dos meios abaixo da superfície.

3 Seção CMP

Para mapear a subsuperfície a partir do tempo de trânsito em afastamento nulo e a velocidade RMS, conforme a seção anterior, é preciso gerar tremores através de uma fonte e registrar o sismograma na superfície por meio de um receptor. Note que, para camadas geológicas horizontais e homogêneas, a aproximação para o tempo de trânsito t em função do meio afastamento h , isto é, a hipérbole de reflexão dada por

$$t(h) \approx \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2}}, \quad (7)$$

é melhor quanto menor for h . A geometria em que fonte e receptor estão na mesma posição é chamada de afastamento nulo ou zero offset. Porém, em geral, o receptor é um dispositivo muito sensível e, portanto, deve estar afastado da fonte para garantir a qualidade do sismograma registrado.

Observe da equação 7 que precisamos estimar dois parâmetros, o tempo de trânsito em afastamento nulo e a velocidade RMS, no entanto temos apenas uma me-

dida, o tempo de trânsito registrado no receptor. Daí, tem-se a necessidade de coletar ao menos duas medidas, isto é, dispor dois receptores alinhados com a fonte sob a superfície, como mostra a Figura 2.

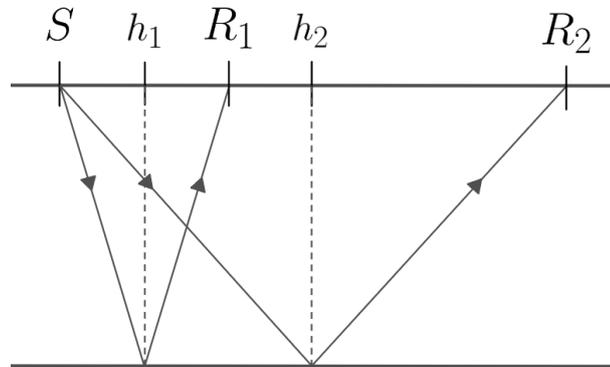


Figura 2: Disposição da fonte (S) e receptores (R_1 e R_2) sob a superfície, sendo h_1 e h_2 o meio afastamento entre fonte e cada receptor. Fonte: Autora.

Dessa configuração, na prática surgem mais dois problemas: o refletor pode não ser horizontal, de modo que a sua profundidade varia, e a velocidade da camada geológica pode não ser constante, variando conforme a posição dos receptores. Isso significa que mais incógnitas estão presentes no modelo, logo o tempo de trânsito já não pode mais ser descrito pela hipérbole de reflexão conforme construção da seção anterior. Uma forma simples de lidar com esses problemas é aumentando a redundância na aquisição dos dados e melhorando a razão sinal/ruído ao dispor diversas fontes e receptores em uma configuração chamada ponto médio comum ou Common Mid Point (CMP), ilustrada na Figura 3. Nela, fontes e receptores são dispostos linearmente e de forma simétrica ao ponto médio entre fontes e receptores.

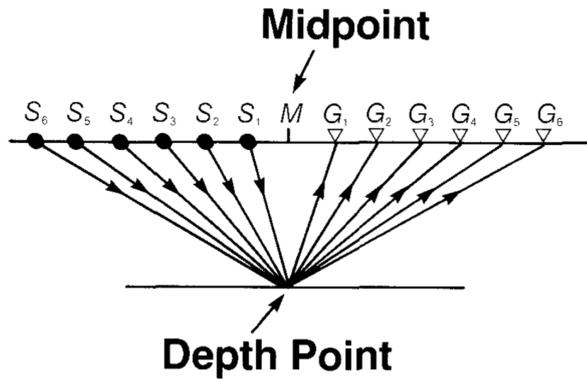


Figura 3: Configuração Common Mid Point (CMP) das fontes (S_1, \dots, S_6) e receptores (G_1, \dots, G_6). Note que se o refletor é horizontal, então na configuração CMP o ponto médio M é igual ao ponto de profundidade D . Fonte: Özdoğan Yılmaz [2000].

De acordo com Özdoğan Yılmaz [2000], a redundância na aquisição dos dados em uma seção CMP decorre de alocar múltiplas fontes por traço, múltiplos receptores por traço e obter múltiplas coberturas de deslocamento do mesmo ponto de subsuperfície. Daí, partindo da suposição de que o sinal de reflexão nos traços é idêntico e o ruído é aleatório e mutuamente não correlacionado de traço para traço, tem-se como consequência o aumento da razão sinal/ruído. Ademais, como a onda propagaria ao longo do mesmo caminho ao comutar receptor e fonte, segue que mesmo se o refletor for curvo e a velocidade do meio variar, a função de tempo de trânsito por afastamento continua sendo uma função par.

Neste caso, como estamos tratando de meios gerais, não convém mais utilizar a velocidade RMS na equação 7, que está definida para subsuperfícies horizontalmente estratificadas e homogêneas. Nesse sentido, de acordo com Özdoğan Yılmaz [2000], a diferença de tempo entre o tempo de trânsito em um dado afastamento, $t(h)$, e o tempo de trânsito em afastamento nulo, t_0 , é chamada *normal moveout* (NMO). Daí, a velocidade necessária para corrigir o tempo de trânsito para NMO é chamada velocidade NMO. Daí, sendo v_{NMO} a velocidade NMO, segue que

$$t(h) = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}},$$

de onde observamos que, para afastamentos pequenos, a velocidade NMO para uma subsuperfície horizontalmente estratificada e homogênea é igual à velocidade RMS.

Dessa forma, temos uma configuração com múltiplos afastamentos, de modo que os tempos de trânsito das ondas que propagam conforme a Figura 3 podem ser descritos por hipérbolas de reflexão em função do afastamento e, assim, estimar os parâmetros referentes às mesmas. O gráfico com os sismogramas gerados por cada receptor em função do afastamento é chamado seção sísmica ou, neste caso, seção CMP e este será utilizado para observar a hipérbole de reflexão e realizar a análise de velocidade da subsuperfície.

4 Análise de velocidade

Uma vez obtidas as seções CMP, é preciso realizar algum processo de análise de velocidade para conhecer os meios abaixo da superfície. A seguir, estão detalhados os métodos estudados ao longo do presente projeto. As implementações correspondentes estão disponíveis no Apêndice A.

4.1 Espectro de velocidade

Conforme Özdogan Yilmaz [2000], a ideia do espectro de velocidade é exibir uma medida de coerência de sinal em um gráfico de velocidade versus tempo de trânsito em afastamento nulo, de modo a escolher a função de velocidade que produz a maior coerência em regiões do espectro com amplitudes de evento sísmico significativas. Veremos a seguir como essa técnica será explorada no presente projeto.

De acordo com Özdogan Yilmaz [2000], a amplitude empilhada de uma seção sísmica é definida como

$$f_{st} = \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)},$$

onde M é a quantidade de traços sísmicos na seção analisada e $f_{i,t(i)}$ é a amplitude registrada no i -ésimo traço e tempo dado por $t(i)$, que refere-se à hipérbole de empilhamento teste dada por

$$t(i) = \sqrt{t_0^2 + \frac{4h_i^2}{v_{st}^2}},$$

onde t_0 é o tempo de trânsito em afastamento nulo e v_{st} é a velocidade de empilhamento testes, sendo h_i o meio afastamento correspondente ao i -ésimo receptor, com $i = 1, \dots, M$. Note que se o i -ésimo receptor não tiver registrado sinal no tempo exato $t(i)$, basta realizar a interpolação linear entre os registros mais próximos antes e depois de $t(i)$. Ao processo da soma ao longo dos traços sísmicos chamamos de empilhamento.

De modo geral, de acordo com Hill and Rüger [2019], o espectro de velocidade representa um conjunto de tentativas de empilhamento, que se distinguem pelas escolhas de t_0 e v_{st} que definem a hipérbole de empilhamento. Contudo, é possível ainda calcular uma medida de correlação entre as amplitudes registradas ao longo dessa hipérbole, que em geral envolve a expressão para a amplitude empilhada, f_{st} . Assim, o espectro de velocidade é obtido ao definir uma malha de interesse para t_0 e outra para v_{st} , sendo que em cada coordenada está a medida de correlação correspondente, estando representado assim o conjunto de tentativas de empilhamento.

Para o presente projeto, considere apenas subsuperfícies com camadas horizontais e homogêneas, para as quais o tempo de trânsito em função do meio afastamento pode ser aproximado por uma hipérbole de reflexão conforme a equação 7. Daí, no espectro de velocidade, quanto melhor a aproximação de t_0 e quanto mais próximo a velocidade de empilhamento estiver da velocidade RMS para alguma camada, então maior é a medida de correlação correspondente. Dessa forma, é possível identificar os eventos sísmicos correspondentes à reflexão da onda em cada camada ao observar as maiores medidas de correlação presentes no espectro de velocidade. Finalmente, dessa identificação, obtém-se aproximações para o tempo de trânsito em afastamento nulo e a velocidade RMS dos refletores.

4.1.1 Semblance

A semblance, S , é uma medida de correlação definida, de acordo com Taner and Koehler [1969], como

$$S = \frac{1}{M} \frac{\sum_t \left(\sum_{i=1}^M f_{i,t(i)} \right)^2}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)}^2}, \quad (8)$$

onde M , $f_{i,t(i)}$ e $t(i)$ são definidos conforme a seção anterior e o somatório em t diz respeito à somar os valores dentro de uma janela temporal. No presente projeto consideramos um parâmetro $w \in \mathbb{N}$ que define uma janela temporal de comprimento $2w + 1$ pixels e centrada em $t(i)$. Daí, toma-se as amplitudes registradas em cada receptor no tempo definido pela função t transladada ao longo dessa janela. Desse método, obtemos a seguinte definição da semblance

$$S = \frac{1}{M} \frac{\sum_{t=-w}^w \left(\sum_{i=1}^M f_{i,t(i)+t} \right)^2}{\sum_{t=-w}^w \sum_{i=1}^M f_{i,t(i)+t}^2}. \quad (9)$$

Assim, conforme Hill and Rüger [2019], a semblance é o quadrado das amplitudes empilhadas calculado sobre uma janela temporal normalizado pela soma do quadrado das amplitudes individuais sobre a mesma janela. Observe que, se todos os valores de amplitude em todos os traços forem iguais, ou seja, se $f_{t,t(i)+t} = k$ para todo i e t , então

$$S = \frac{1}{M} \frac{\sum_{t=-w}^w (Mk)^2}{\sum_{t=-w}^w Mk^2} = 1,$$

o que representa a forte coerência de sinal. Já se esses valores forem aleatórios com média 0, isto é, ruídos, então $S = 0$. Daí, para qualquer outros valores, tem-se $0 < S < 1$.

Nesse sentido, note como as amplitudes empilhadas no numerador já cumprem um papel importante em amenizar o ruído, já que amplitudes positivas e negativas correspondentes à ele são somadas, levando a S mais próximo de 0. De acordo com Hill and Rüger [2019], o somatório temporal no numerador melhora ainda mais a razão de sinal por ruído da seção sísmica. Observe apenas que, como cada traço empilhado pode ser positivo ou negativo, é mais adequado elevá-los ao quadrado antes de somá-los ao longo da janela temporal, de modo a acentuar ainda as maiores amplitudes e atenuar ruídos. Já o denominador mantém o valor da semblance baixo na presença de ruído de alta amplitude

Contudo, uma janela temporal grande aumenta a razão de sinal por ruído e diminui a resolução vertical da velocidade, já que considera uma parcela grande de cada traço sísmico para obter tais velocidades. Assim, é necessário balancear o

tamanho dessa janela para alcançar o ponto mais adequado entre os dois efeitos.

4.1.2 Identificação dos eventos

Uma vez obtido o espectro de velocidade baseado na semblance, é preciso identificar as regiões que de fato correspondem à eventos sísmicos, isto é, à reflexão da onda em determinada camada da subsuperfície, a qual está associada a valores altos da semblance.

Para o caso de uma subsuperfície com um único refletor, uma forma simples de identificar o único evento sísmico é tomar a combinação de parâmetros t_0 e v_{st} que implicam no maior valor da semblance. Daí, temos as aproximações $t_{0,1} = t_0$ e $v_{RMS,1} = v_{st}$.

No entanto, para uma subsuperfície com n refletores, não basta simplesmente tomar os n maiores valores da semblance. Isso porque, para um mesmo evento sísmico, temos uma região no espectro de velocidade que assume medida de correlação alta, principalmente se a janela temporal for grande, já que isso diminui a resolução vertical da velocidade. Assim, mais de um dos n maiores valores da semblance podem referir-se à um único evento sísmico.

A abordagem escolhida para tratar tal particularidade consiste em, primeiramente, identificar no espectro de velocidade quantos eventos sísmicos existem ao observar a quantidade de regiões que se destacam por terem valores altos da semblance. Em seguida, para cada valor da malha de t_0 , tomar o valor máximo da semblance obtido ao variar o parâmetro v_{st} , obtendo assim uma função que depende de t_0 . Daí, nesta função, basta identificar os valores de t_0 associados aos máximos locais e, finalmente, obter os respectivos parâmetros v_{st} .

Observe que, o último passo descrito anteriormente pode ser feito identificando intervalos na malha de t_0 que estejam acima de um limiar. Esse limiar deve ser ajustado até que o número de intervalos encontrados seja igual à quantidade de eventos apontada no primeiro passo. Assim, em cada intervalo temos um único evento sísmico e sua identificação é feita igual ao caso de uma subsuperfície com um único refletor explicado anteriormente.

Dessa forma, dos procedimentos detalhados nesta seção, obtemos a partir

do espectro de velocidade baseado na semblance as aproximações para o tempo de trânsito em afastamento nulo e a velocidade RMS de cada refletor de forma automatizada. Observe ainda que os parâmetros estão associados às camadas conforme o ordenamento dos valores de t_0 encontrados: quanto maior o t_0 , mais profunda a camada. No entanto, notamos que a automatização falha quando o nível de ruído é alto e a semblance assume valores grandes ao longo de não eventos. Além disso, é importante é garantir que não sejam detectados vários picos pertencentes ao mesmo evento e que eventos distintos não sejam eliminados, do contrário o método automatizado pode falhar.

4.2 Fórmula de Dix

Conforme detalhado na Seção 2, cada refletor possui uma velocidade RMS associada, além do tempo de trânsito da onda que se propaga na direção vertical até este refletor. Nesse sentido, em posse de tais informações referentes à camada atual e à anterior, é possível obter a velocidade de propagação da camada atual através da Fórmula de Dix, além da espessura desse meio, conforme Dix [1995].

Primeiro, veja que

$$v_{RMS,1}^2 = \frac{v_1^2 \Delta t_1}{\Delta t_1} = v_1^2 \Rightarrow v_1 = v_{RMS,1},$$

$$t_{0,1} = 2\Delta t_1 \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{t_{0,1}}{2}.$$

Assim temos a velocidade de propagação da onda no primeiro meio, v_1 , e, por definição, é possível obter sua espessura, Δz_i , dada por $\Delta z_i = v_1 \Delta t_1$, que é igual à profundidade dessa camada, $d_1 = \Delta z_i$.

Agora, considere n refletores horizontais e suponha que $v_{RMS,n}$ e $t_{0,n}$ sejam conhecidos, além de $v_{RMS,n-1}$ e $t_{0,n-1}$. Veja que

$$\frac{t_{0,n}}{2} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i + \Delta t_n = \frac{t_{0,n-1}}{2} + \Delta t_n$$

$$\Rightarrow \Delta t_n = \frac{t_{0,n} - t_{0,n-1}}{2}$$

e

$$\begin{aligned}
v_{RMS,n}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \\
\Rightarrow v_{RMS,n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i &= \sum_{i=1}^{n-1} v_i^2 \Delta t_i + v_n^2 \Delta t_n \\
\Rightarrow v_n^2 &= \frac{1}{\Delta t_n} \left(v_{RMS,n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i - \sum_{i=1}^{n-1} v_i^2 \Delta t_i \right) \\
\Rightarrow v_n^2 &= \frac{1}{\Delta t_n} \left(v_{RMS,n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} v_i^2 \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \right) \\
\Rightarrow v_n^2 &= \frac{v_{RMS,n}^2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i - v_{RMS,n-1}^2 \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i}{\Delta t_n} \\
\Rightarrow v_n^2 &= \frac{v_{RMS,n}^2 t_{0,n}/2 - v_{RMS,n-1}^2 t_{0,n-1}/2}{(t_{0,n} - t_{0,n-1})/2}.
\end{aligned}$$

Assim, temos a Fórmula de Dix

$$v_n^2 = \frac{v_{RMS,n}^2 t_{0,n} - v_{RMS,n-1}^2 t_{0,n-1}}{t_{0,n} - t_{0,n-1}}. \quad (10)$$

Dessa forma, obtemos a velocidade de propagação da onda no n -ésimo meio, v_n , bem como a espessura do mesmo, $\Delta z_n = v_n \Delta t_n$. Uma vez conhecida a profundidade do meio anterior, temos também que a profundidade no n -ésimo refletor, d_n , é dada por $d_n = d_{n-1} + \Delta z_n$.

4.3 Resultados

A análise de velocidade a partir dos métodos detalhados e implementados anteriormente foi validada a partir de seções CMP fornecidas pelos professores orientadores, as quais foram geradas computacionalmente, sendo todas referentes à camadas horizontais e homogêneas. A seguir, seguem os resultados encontrados. Em todos os casos, a amostragem do tempo de trânsito em afastamento nulo no cálculo do espectro de velocidade é igual à amostragem do tempo na seção CMP, afim de evitar redundâncias ao utilizar os dados. Já a malha da velocidade de empilhamento inicia em 1.4 m/ms e termina em 3.5 m/ms, com espaçamento entre as velocidades de 0.025

m/ms.

4.3.1 Seção CMP 1

A primeira seção CMP analisada refere-se à uma configuração simples com um único refletor horizontal, com velocidade de propagação da onda no meio igual à 2 m/ms e profundidade da camada igual a 600 m.

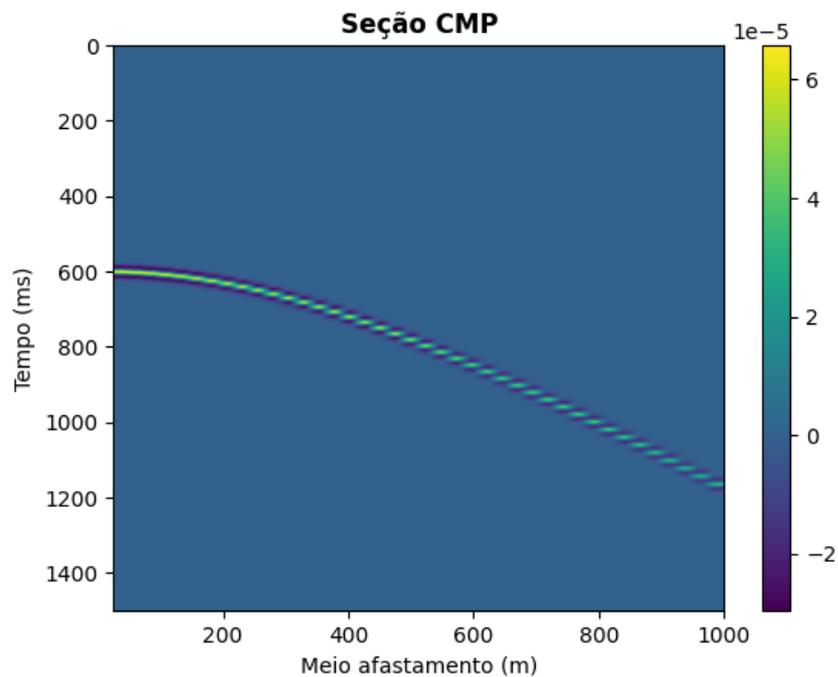


Figura 4: Mapa de amplitudes referente aos dados da seção CMP 1. Fonte: Autora.

Note na Figura 4 que tratam-se de dados não ruidosos. Os sinais gerados computacionalmente em cada traço sísmico são majoritariamente nulos, contendo apenas o pico referente ao evento em si com dois vales ao redor. O espectro de velocidade obtido, utilizando a semblance como medida de correlação, está disposto a seguir.

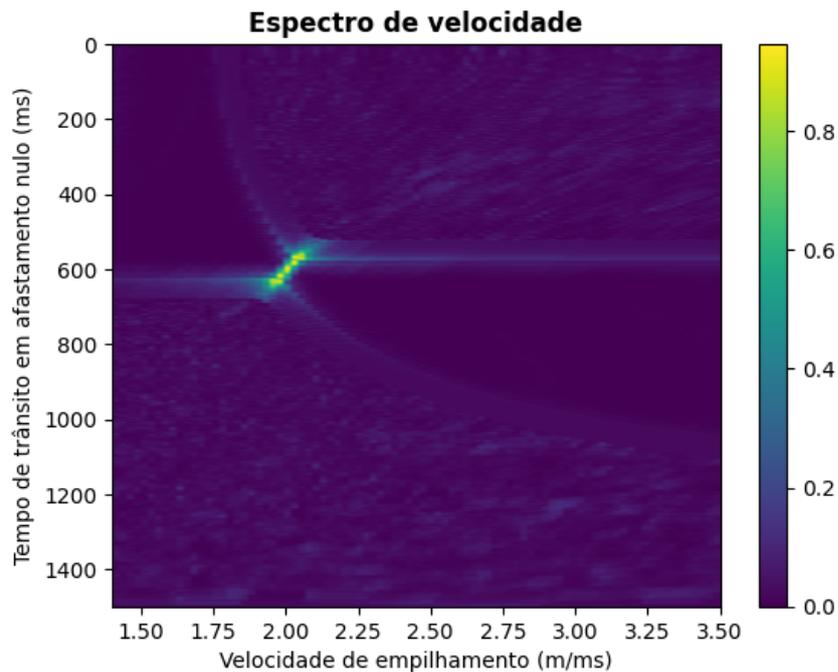
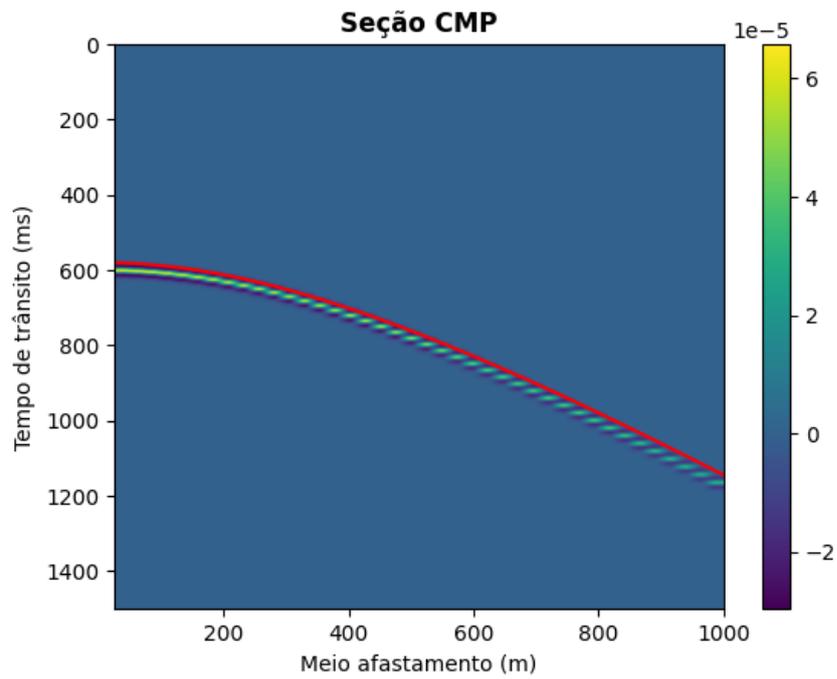
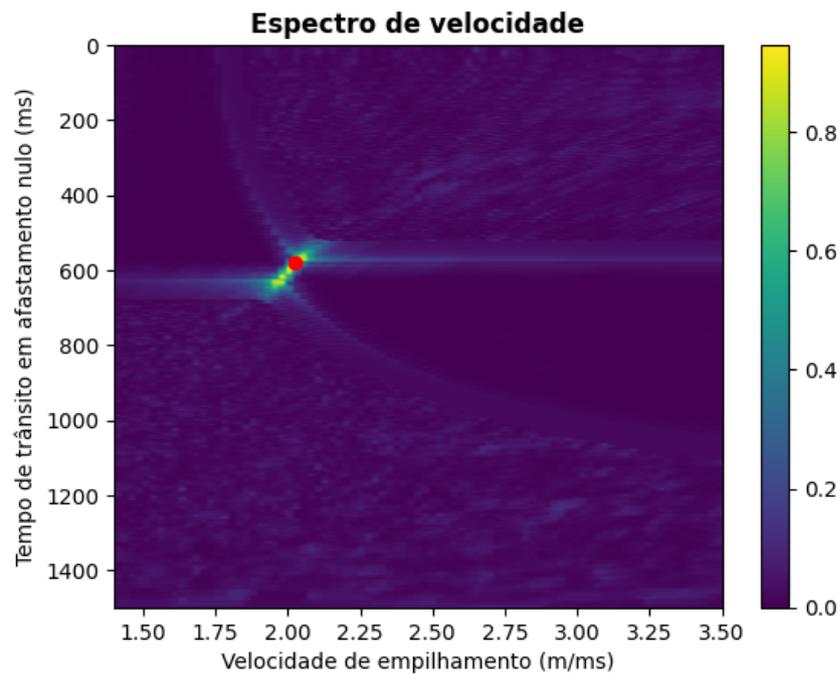


Figura 5: Espectro de velocidade baseado na semblance da seção CMP 1, com parâmetro $w = 3$. Fonte: Autora.

Observe na Figura 5 que de fato é possível identificar um evento, no entanto, mesmo sendo um exemplo simples, já existe certa ambiguidade quanto à localização do pico de semblance. Isso se deve ao comprimento da ondaleta na seção sísmica e faz com que os valores de velocidade determinados possuam um certo grau de incerteza. Ao tomar o pico de semblance, obtemos $v_{st} = 2.025 \text{ m/ms}$ e $t_0 = 580.0 \text{ ms}$.



(a)



(b)

Figura 6: Identificação do evento sísmico na seção CMP 1, com $v_{st} = 2.025$ m/ms e $t_0 = 580.0$ ms no pico de semblance. (a) Mapa de amplitudes da Figura 4, sendo em vermelho a hipérbole de empilhamento calculada com esses parâmetros. (b) Espectro de velocidade da Figura 5, sendo o ponto em vermelho o evento identificado. Fonte: Autora.

Contudo, temos que a v_{st} obtida é a aproximação da velocidade RMS da primeira camada, $v_{RMS,1}$, que por sua vez é a velocidade de propagação da onda no primeiro meio, v_1 . Além disso, temos que o t_0 obtido é a aproximação para $t_{0,1}$, daí a profundidade da camada, d_1 , é dada por $d_1 = (t_{0,1}/2)v_{RMS,1} \approx (t_0/2)v_{st}$, conforme explicado na Seção 4.2. Portanto, segue que $v_1 = 2.025 \text{ m/ms}$ e $d_1 = 587.25 \text{ m}$ aproximadamente.

Note que, como o sinal gerado computacionalmente é composto por um pico entre dois vales, faz sentido que a semblance identifique as correlações existentes tanto ao longo dos picos quanto dos vales, de modo que temos uma faixa em destaque no espectro de velocidade. De fato, na Figura 6a é possível perceber que a hipérbole de reflexão obtida não ajusta tão bem aos dados referentes aos picos, mas sim dos primeiros vales. Isso explica o deslocamento dos resultados encontrados de v_1 e d_1 em relação ao esperado.

4.3.2 Seção CMP 2

A seção CMP 2 foi simulada usando um modelo da terra com três refletores horizontais. Da camada mais próxima à superfície até a mais profunda, tem-se as velocidades de propagação da onda iguais a 1.5, 1.834 e 2.143 m/ms, além das profundidades das camadas sendo 650, 850 e 1000 m, respectivamente. Daí, esta seção foi gerada computacionalmente a partir da equação 6 ao colocar como parâmetros as velocidades RMS e tempos de trânsito em afastamento nulo exatos, o que é apenas uma aproximação para os sinais sísmicos que de fato seriam observados, tendo assim hipérboles exatas. A seguir, o gráfico apresenta os dados referentes à esta seção.

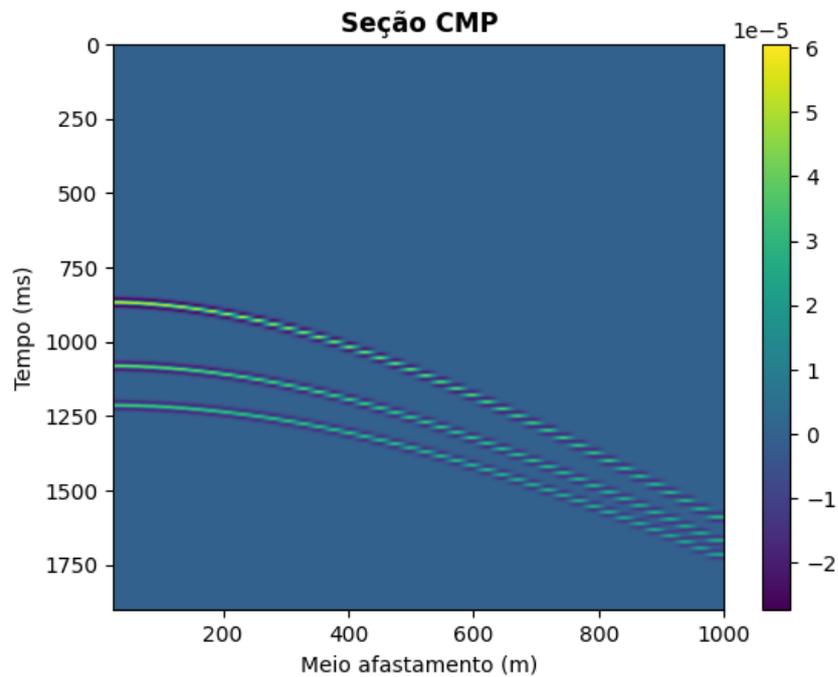
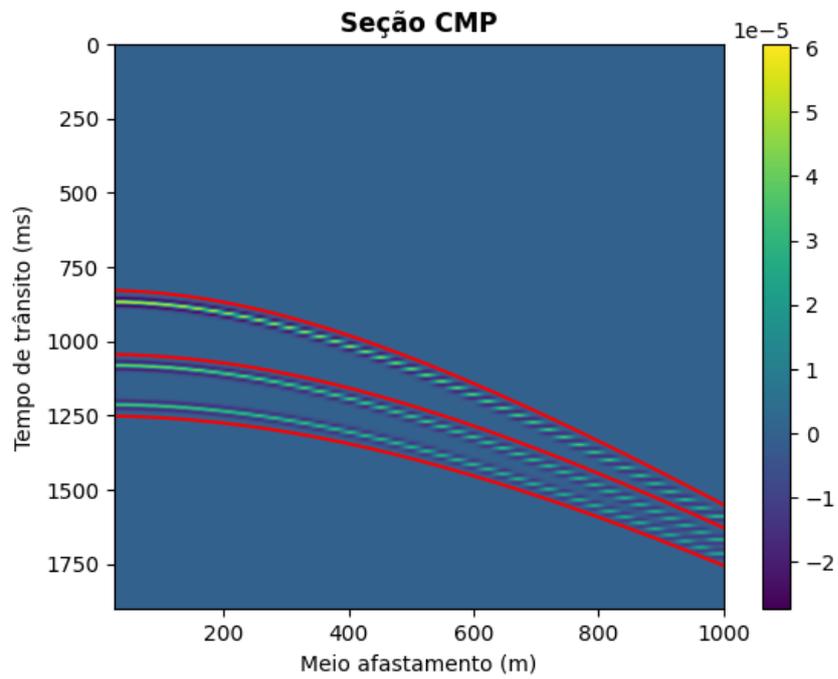


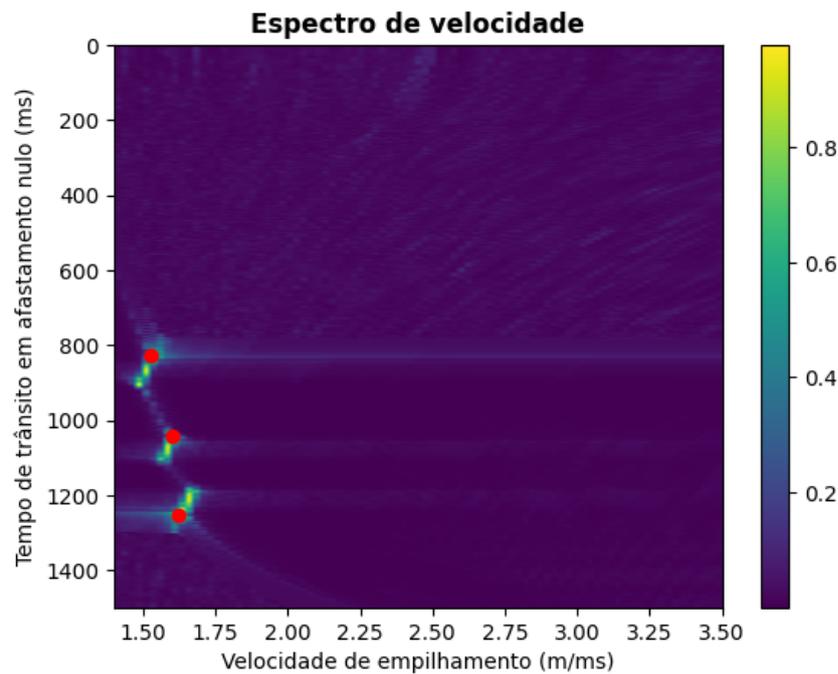
Figura 7: Mapa de amplitudes referente aos dados da seção CMP 2. Fonte: Autora.

Novamente, observa-se da Figura 7 que temos dados não ruidosos, análogo ao observado na Seção 4.3.1. Para esta seção CMP, foram feitos dois experimentos, obtendo as aproximações para as velocidades RMS e tempos de trânsito em afastamento nulo a partir do espectro de velocidade baseado na semblance ao variar o parâmetro relativo ao comprimento da janela temporal, w , entre 5 e 1. Os resultados estão dispostos nas Figuras 8 e 9, respectivamente, e foram obtidos conforme a Seção 4.1.2.

Observe na Figura 8a que as hipérbolas de reflexão não se ajustam tão bem aos eventos, que de fato não parecem estar nítidos no espectro de velocidade da Figura 8b. Já na Figura 9a é possível observar que as hipérbolas de reflexão estão bem melhor ajustadas aos eventos.

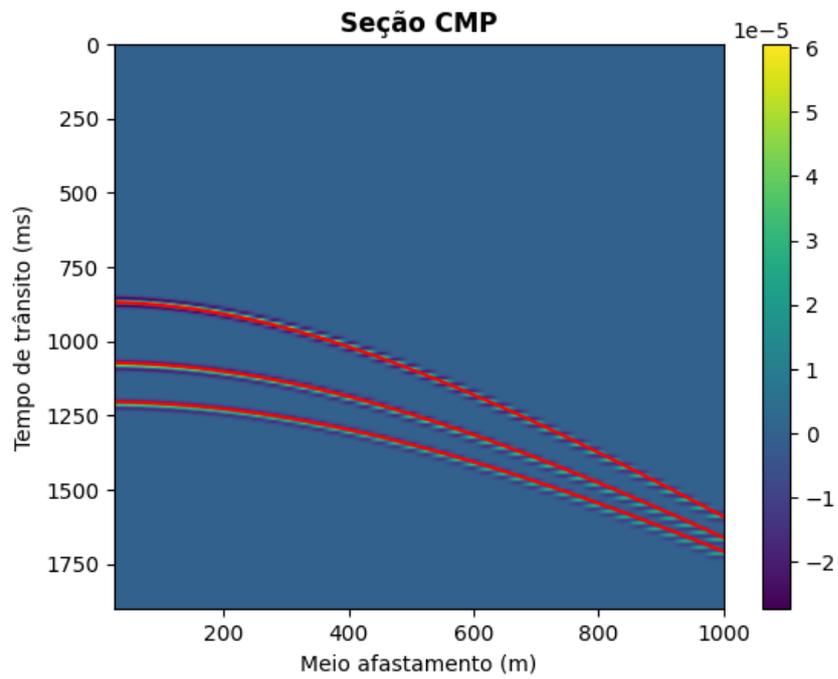


(a)

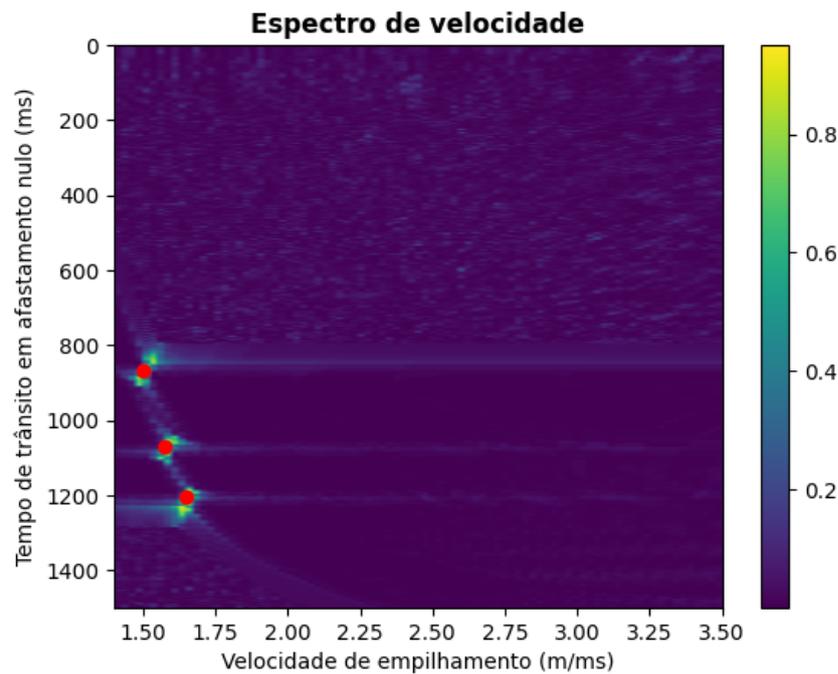


(b)

Figura 8: Identificação dos eventos sísmicos na seção CMP 2 a partir do espectro de velocidade baseado na semblance com parâmetro $w = 5$. Das velocidades de empilhamento e tempos de trânsito em afastamento nulo obtidos, temos as aproximações $[v_{RMS,1}, v_{RMS,2}, v_{RMS,3}] = [1.525, 1.600, 1.625] \text{ m/ms}$ e $[t_{0,1}, t_{0,2}, t_{0,3}] = [828.0, 1044.0, 1252.0] \text{ ms}$. (a) Mapa de amplitudes da Figura 7, sendo em vermelho as hipérbolas de reflexão dos eventos calculadas com tais parâmetros. (b) Espectro de velocidade, sendo os pontos em vermelho a identificação dos eventos. Fonte: Autora.



(a)



(b)

Figura 9: Identificação dos eventos sísmicos na seção CMP 2 a partir do espectro de velocidade baseado na semblance com parâmetro $w = 1$. Das velocidades de empilhamento e tempos de trânsito em afastamento nulo obtidos, temos as aproximações $[v_{RMS,1}, v_{RMS,2}, v_{RMS,3}] = [1.5, 1.575, 1.65] \text{ m/ms}$ e $[t_{0,1}, t_{0,2}, t_{0,3}] = [868.0, 1072.0, 1204.0] \text{ ms}$. (a) Mapa de amplitudes da Figura 7, sendo em vermelho as hipérbolas de reflexão dos eventos calculadas com tais parâmetros. (b) Espectro de velocidade, sendo os pontos em vermelho a identificação dos eventos. Fonte: Autora.

Daí, para obter as velocidades de propagação da onda nas camadas, bem como suas profundidades, aplicou-se em cada experimento a Fórmula de Dix, estando os resultados dispostos na Tabela 1.

Seção CMP 2				
Camada	Variável	Real	$w=5$	$w=1$
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.500	1.525	1.500
	$t_{0,1}$ (m)	867	828	868
	v_1 (m/ms)	1.500	1.525	1.500
	d_1 (m)	650	631	651
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.573	1.600	1.575
	$t_{0,2}$ (m)	1085	1044	1072
	v_2 (m/ms)	1.834	1.860	1.861
	d_2 (m)	850	832	841
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.648	1.625	1.650
	$t_{0,3}$ (m)	1225	1252	1204
	v_3 (m/ms)	2.143	1.745	2.165
	d_3 (m)	1000	1014	984

Tabela 1: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3$ da seção CMP 2, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidades com a semblance, variando o parâmetro w .

Os resultados para a camada 3 chamam a atenção. Enquanto no caso em que a semblance foi calculada com $w = 1$, isto é, com somente uma amostra para cada lado do centro da janela, a aproximação da velocidade v_3 é 1% maior que a esperada, já com $w = 5$ é quase 19% menor. Contudo, este efeito não se estende à aproximação da profundidade nesta mesma camada, que é melhor quando $w = 5$, consequência do erro ligeiramente maior da velocidade na camada 2. Para as demais camadas, as aproximações são de fato melhores quando $w = 1$.

Das observações acima têm-se a hipótese de que para seções CMP não ruidosas é melhor que, ao usar a semblance como medida de correlação para construir o espectro de velocidades, o parâmetro w seja pequeno. Afinal, o objetivo dos somatórios no tempo na equação 9 é justamente minimizar o efeito dos ruídos, sendo que quanto maior o valor de w , maior a redundância, mas menor a resolução vertical da velocidade, além de a semblance identificar também a correlação ao longo dos vales. Assim, quando $w = 5$, a hipérbole de reflexão acaba ficando acima dos dois primeiros eventos

e abaixo do terceiro, o que explica também a aproximação da velocidade da terceira camada ter ficado tão abaixo do esperado.

4.3.3 Seção CMP 3

Na seção CMP 3 temos eventos verdadeiros correspondentes à subsuperfície da seção CMP 2. Isso significa que os dados foram gerados a partir da real propagação da onda dentro das camadas, o que corresponde à eventos aproximadamente hiperbólicos e não hipérboles exatas, como no caso anterior.

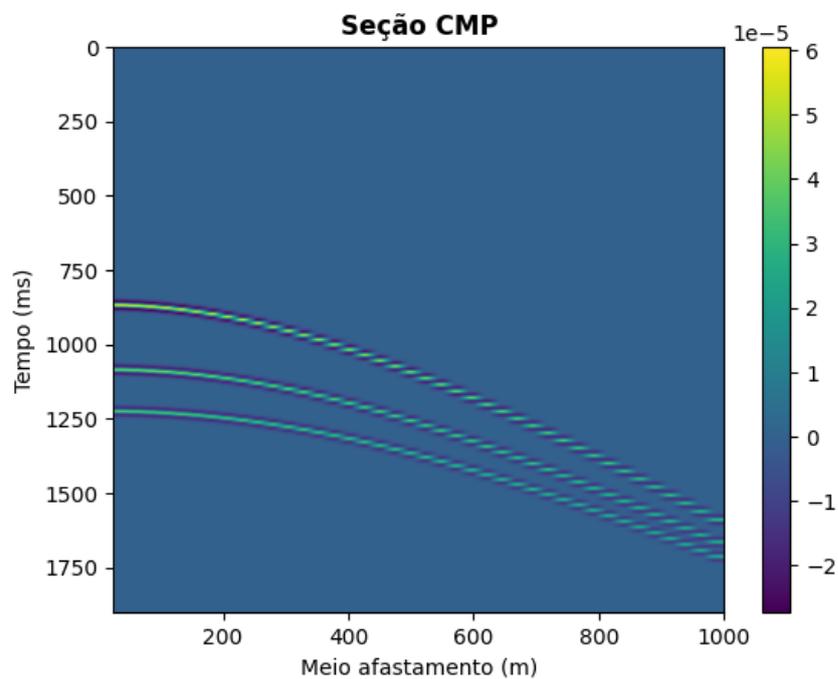


Figura 10: Mapa de amplitudes referente aos dados da seção CMP 3. Fonte: Autora.

Afim de validar as hipóteses geradas na Seção 4.3.2 quanto à influência da escolha do parâmetro w da semblance na resolução dos resultados, foram feitos uma série de experimentos variando o mesmo. Os resultados estão dispostos na Tabela 2.

Seção CMP 3							
Camada	Variável	Real	$w = 1$	$w = 3$	$w = 5$	$w = 7$	$w = 9$
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.500	1.500	1.525	1.525	1.525	1.525
	$t_{0,1}$ (ms)	867	868	840	828	832	824
	v_1 (m/ms)	1.500	1.500	1.525	1.525	1.525	1.525
	d_1 (m)	650	651	641	631	634	628
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.573	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
	$t_{0,2}$ (ms)	1085	1064	1056	1048	1052	1056
	v_2 (m/ms)	1.834	1.983	1.863	1.855	1.856	1.842
	d_2 (m)	850	845	842	835	839	842
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.648	1.625	1.650	1.650	1.650	1.625
	$t_{0,3}$ (ms)	1225	1204	1256	1264	1260	1276
	v_3 (m/ms)	2.143	2.162	1.892	1.874	1.883	1.740
	d_3 (m)	1000	997	1031	1038	1034	1033

Tabela 2: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3$ da seção CMP 3, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidades com a semblance, variando o parâmetro w .

Primeiro, veja que o parâmetro mais sensível à variação do tamanho da janela não é a velocidade de empilhamento que aproxima a velocidade RMS, mas o tempo de trânsito em afastamento nulo. Ademais, vale ressaltar que o parâmetro $w = 9$ leva à uma janela temporal na semblance de comprimento igual a 19, o que é maior que o tamanho do pulso para a seção sísmica gerada, dificultando a obtenção da coerência de sinal.

A mesma observação quanto à aproximação de v_3 que foi feita para a seção CMP 2 pode se estender para a seção CMP 3, sendo que tal aproximação só é razoável para $w = 1$, já que quanto maior o w mais distante fica a aproximação do valor verdadeiro. Para a primeira camada, o caso em que $w = 1$ também fornece as melhores aproximações, enquanto que para a segunda o caso $w = 1$ acaba fornecendo a pior aproximação para v_2 , mas a melhor para d_2 .

Contudo, ao analisar seções CMP sem ruído, conclui-se que aumentar o parâmetro w é prejudicial, pois o único efeito é a diminuição da resolução vertical das velocidades. Assim, apesar de uma aproximação ruim para velocidade de propagação da onda na segunda camada, o parâmetro $w = 1$ apresenta os melhores resultados.

4.3.4 Seção CMP 4

A seção CMP 4 foi simulada usando um modelo de terra com 5 refletores. Na Seção 4.3.3 avaliou-se como o parâmetro w da semblance influencia as estimativas das características do meio. Aqui, o objetivo é analisar como essas estimativas dependem de diferentes níveis de ruído aleatório adicionados aos dados.

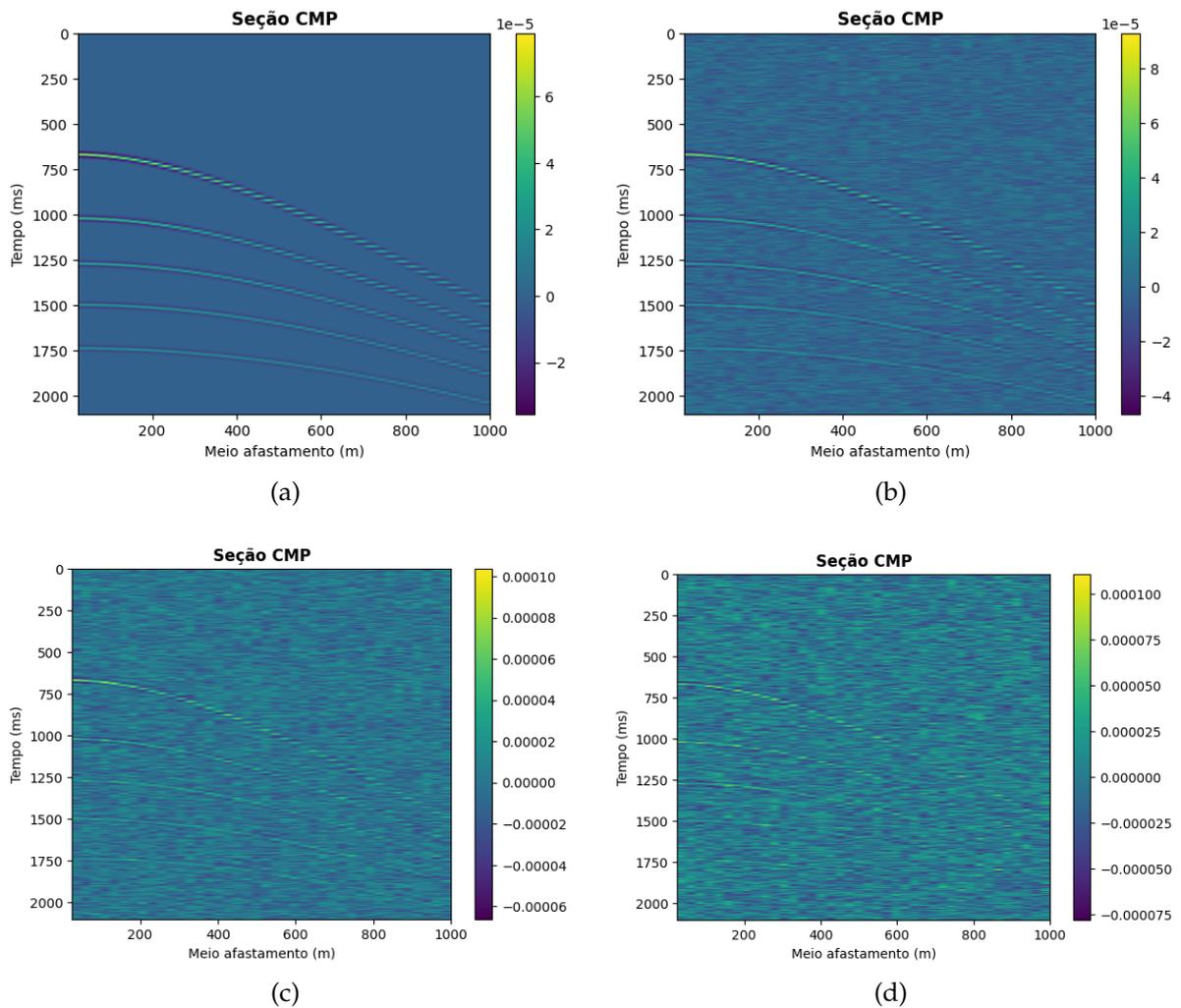


Figura 11: Mapa de amplitudes referente aos dados da seção CMP 4 com variação no nível de ruído aleatório, isto é, a porcentagem da amplitude do maior pico no dado adicionada aos sinais. (a) 0%. (b) 20%. (c) 40%. (d) 60%. Fonte: Autora.

Para construir o espectro de velocidades baseado na semblance utilizou-se o parâmetro $w = 5$ em todos os experimentos. Os gráficos estão dispostos a seguir.

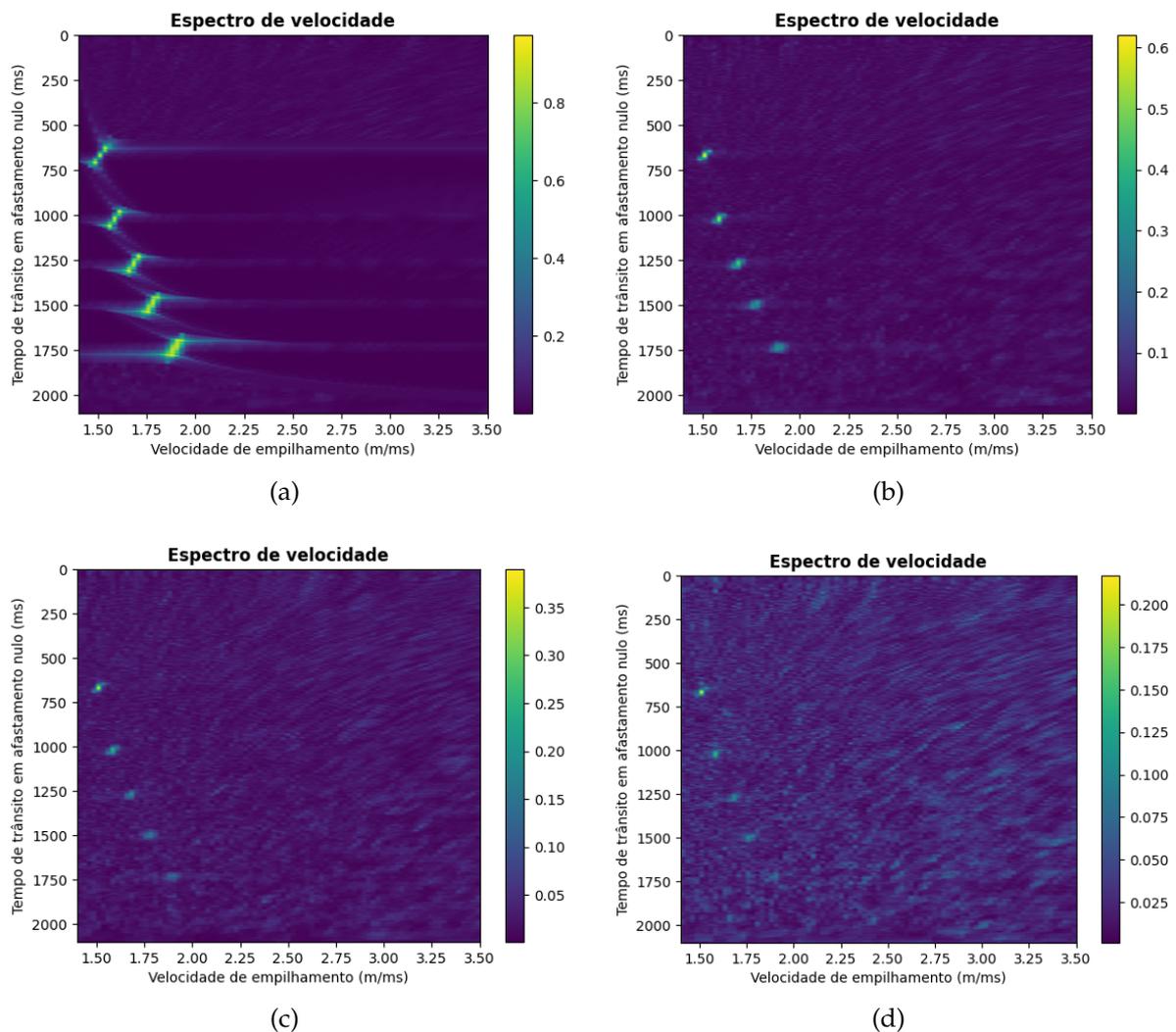


Figura 12: Espectro de velocidade baseado na semblance, com $w = 5$, da seção CMP 4 e suas variações no nível de ruído aleatório. (a) 0%. (b) 20%. (c) 40%. (d) 60%. Fonte: Autora.

Para o caso com nível de ruído sendo 60%, observa-se da Figura 12d que especialmente o último evento sísmico não tem mais grande destaque, sendo que outras regiões que não correspondem à eventos assumem valores da semblance similares. Assim, ao tentar identificar os eventos a partir do método descrito na Seção 4.1.2, tais regiões também foram identificadas. Assim, antes de aplicar a fórmula de Dix, foi necessário descartar as identificações equivocadas, logo tal processo deixou de ser totalmente automatizado. Isso explica em parte porque, em dados reais, a identificação automática dos eventos nos espectros de velocidade ainda é o desafio. Outro problema nesse sentido é a existência de eventos de reflexão múltipla, não simulados nos nossos

experimentos. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Seção CMP 4						
Camada	Variável	Real	Nível de ruído			
			0%	20%	40%	60%
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.5	1.475	1.500	1.500	1.500
	$t_{0,1}$ (ms)	667	704	672	668	668
	v_1 (m/ms)	1.500	1.475	1.500	1.500	1.500
	d_1 (m)	500	519	504	501	501
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.572	1.550	1.575	1.575	1.575
	$t_{0,2}$ (ms)	1020	1056	1020	1016	1020
	v_2 (m/ms)	1.700	1.690	1.711	1.710	1.708
	d_2 (m)	800	817	802	799	802
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.665	1.650	1.675	1.675	1.675
	$t_{0,3}$ (ms)	1270	1308	1268	1268	1280
	v_3 (m/ms)	2.000	2.016	2.035	2.029	2.020
	d_3 (m)	1050	1071	1054	1054	1064
4	$v_{RMS,4}$ (m/ms)	1.757	1.750	1.775	1.775	1.750
	$t_{0,4}$ (ms)	1497	1536	1488	1508	1496
	v_4 (m/ms)	2.200	2.239	2.267	2.230	2.141
	d_4 (m)	1300	1326	1303	1322	1296
5	$v_{RMS,5}$ (m/ms)	1.877	1.875	1.875	1.900	1.900
	$t_{0,5}$ (ms)	1737	1776	1736	1720	1724
	v_5 (m/ms)	2.500	2.533	2.389	2.611	2.684
	d_5 (m)	1600	1630	1600	1604	1601

Tabela 3: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3, 4, 5$ da seção CMP 4 com diferentes níveis de ruído, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidade baseado na semblance com parâmetro $w = 5$.

De modo geral, as aproximações melhoram com o aumento do nível do ruído, principalmente para as primeiras camadas. Observe apenas que, para a última camada, a aproximação da velocidade é melhor quando não há ruído, mas esse comportamento parece ser uma exceção. Contudo, conclui-se que a janela temporal na semblance é de fato mais efetiva para seções sísmicas ruidosas.

Ao analisar a seção CMP 3 não ruidosa variando o parâmetro w , constatou-se que quando a janela temporal da semblance é menor, isto é, quando $w = 1$ as aproximações ficaram melhores do que para janelas maiores. Agora, vamos repetir tal análise para as seções ruidosas do CMP 4.

Seção CMP 4 com 20% de ruído							
Camada	Variável	Real	$w = 1$	$w = 3$	$w = 5$	$w = 7$	$w = 9$
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	$t_{0,1}$ (ms)	667	668	672	672	672	664
	v_1 (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	d_1 (m)	500	501	504	504	504	498
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.572	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575
	$t_{0,2}$ (ms)	1020	1016	1016	1020	1024	1020
	v_2 (m/ms)	1.700	1.710	1.712	1.711	1.709	1.706
	d_2 (m)	800	799	798	802	805	802
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.665	1.6749	1.675	1.675	1.675	1.675
	$t_{0,3}$ (ms)	1270	1272	1268	1268	1264	1268
	v_3 (m/ms)	2.000	2.024	2.029	2.035	2.048	2.035
	d_3 (m)	1050	1058	1054	1054	1050	1054
4	$v_{RMS,4}$ (m/ms)	1.757	1.75	1.775	1.775	1.775	1.7500
	$t_{0,4}$ (ms)	1497	1504	1492	1488	1488	1524
	v_4 (m/ms)	2.200	2.114	2.259	2.267	2.258	2.082
	d_4 (m)	1300	1303	1307	1303	1303	1321
5	$v_{RMS,5}$ (m/ms)	1.877	1.875	1.875	1.875	1.900	1.900
	$t_{0,5}$ (ms)	1737	1744	1736	1736	1716	1712
	v_5 (m/ms)	2.500	2.521	2.397	2.389	2.571	2.837
	d_5 (m)	1600	1605	1600	1600	1596	1587

Tabela 4: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3, 4, 5$ da seção CMP 4 com 20% de ruído, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidades com a semblance variando o parâmetro w .

Primeiro, observe na Tabela 4 que com 20% de ruído as aproximações para as camadas 1 e 2 são boas para qualquer uma das escolhas de w , sendo a aproximação de velocidade mais distante cerca de 0,7% maior, enquanto a da profundidade é 0,8% maior. Daí, para as demais camadas, as aproximações pioram com a profundidade das mesmas, mas nenhuma escolha de w chama a atenção por levar a aproximações muito equivocadas. Na verdade, torna-se difícil determinar o valor para w que proporcionou melhores aproximações, já que para cada variável e camada essa decisão varia. Contudo, para níveis baixos de ruído, a escolha do parâmetro w da semblance torna-se arbitrária, já que não afeta expressivamente a qualidade dos resultados.

Seção CMP 4 com 40% de ruído							
Camada	Variável	Real	$w = 1$	$w = 3$	$w = 5$	$w = 7$	$w = 9$
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	$t_{0,1}$ (ms)	667	668	668	668	668	668
	v_1 (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
	d_1 (m)	500	501	501	501	501	501
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.572	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575
	$t_{0,2}$ (ms)	1020	1020	1016	1016	1024	1024
	v_2 (m/ms)	1.700	1.708	1.710	1.710	1.707	1.707
	d_2 (m)	800	802	799	799	805	805
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.665	1.675	1.675	1.675	1.675	1.675
	$t_{0,3}$ (ms)	1270	1280	1272	1268	1268	1268
	v_3 (m/ms)	2.000	2.020	2.024	2.029	2.042	2.042
	d_3 (m)	1050	1064	1058	1054	1054	1054
4	$v_{RMS,4}$ (m/ms)	1.757	1.775	1.775	1.775	1.775	1.775
	$t_{0,4}$ (ms)	1497	1508	1504	1508	1488	1488
	v_4 (m/ms)	2.200	2.256	2.245	2.230	2.267	2.267
	d_4 (m)	1300	1321	1318	1322	1303	1303
5	$v_{RMS,5}$ (m/ms)	1.877	1.875	1.900	1.900	1.900	1.900
	$t_{0,5}$ (ms)	1737	1732	1732	1720	1720	1724
	v_5 (m/ms)	2.500	2.444	2.577	2.611	2.561	2.551
	d_5 (m)	1600	1595	1612	1604	1600	1604

Tabela 5: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3, 4, 5$ da seção CMP 4 com 40% de ruído, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidades com a semblance variando o parâmetro w .

Agora, com 40% de ruído, ao usar $w = 1$ o ruído dificulta a análise, já que uma região que não corresponde à um evento sísmico possui valor de semblance no pico maior que na região onde estava último evento, logo foi necessário retirá-la manualmente. Assim, já pode-se constatar que a escolha $w = 1$ não é ideal para este caso, pois dificulta a análise de velocidade no processo automático de identificação dos eventos. Quanto à qualidade das aproximações, observa-se da Tabela 6 que a escolha de w não faz diferença alguma para a primeira camada e influencia pouco para a segunda. Para as demais camadas mais profundas, a escolha de w passa a ter uma influência maior, mas ainda assim todas as aproximações são razoáveis, não havendo nenhuma que se destaque pela baixa qualidade. Em geral, para a camada 3, as aproximações são melhores para $w = 3$; para a camada 4, $w = 5$ e, para a camada

5, $w = 7$. Contudo, conclui-se que, para níveis médios de ruído, um valor muito baixo como $w = 1$ dificulta a identificação dos eventos, mas para as demais escolhas $w \in \{3, 5, 7, 9\}$ as aproximações são razoáveis, com uma ligeira vantagem de janelas maiores para refletores mais profundos.

Seção CMP 4 com 60% de ruído							
Camada	Variável	Real	$w = 1$	$w = 3$	$w = 5$	$w = 7$	$w = 9$
1	$v_{RMS,1}$ (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.525
	$t_{0,1}$ (ms)	667	668	668	668	668	636
	v_1 (m/ms)	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.525
	d_1 (m)	500	501	501	501	501	485
2	$v_{RMS,2}$ (m/ms)	1.572	1.575	1.575	1.575	1.575	1.575
	$t_{0,2}$ (ms)	1020	1020	1012	1020	1012	1024
	v_2 (m/ms)	1.700	1.708	1.711	1.708	1.711	1.654
	d_2 (m)	800	802	795	802	795	806
3	$v_{RMS,3}$ (m/ms)	1.665	1.675	1.675	1.675	1.675	1.700
	$t_{0,3}$ (ms)	1270	1272	1272	1280	1268	1240
	v_3 (m/ms)	2.000	2.030	2.018	2.020	2.022	2.198
	d_3 (m)	1050	1057	1058	1064	1054	1043
4	$v_{RMS,4}$ (m/ms)	1.757	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750
	$t_{0,4}$ (ms)	1497	1504	1500	1496	1512	1504
	v_4 (m/ms)	2.200	2.114	2.120	2.141	2.097	1.968
	d_4 (m)	1300	1303	1299	1296	1310	1303
5	$v_{RMS,5}$ (m/ms)	1.877	-	-	1.900	1.900	-
	$t_{0,5}$ (ms)	1737	-	-	1724	1712	-
	v_5 (m/ms)	2.500	-	-	2.684	2.784	-
	d_5 (m)	1600	-	-	1601	1588	-

Tabela 6: Aproximações das velocidades RMS ($v_{RMS,i}$), tempos de trânsito em afastamento nulo ($t_{0,i}$), velocidades de propagação da onda nos meios (v_i) e profundidade (d_i) das camadas $i = 1, 2, 3, 4, 5$ da seção CMP 4 com 60% de ruído, tendo tanto a real quanto aquelas obtidas a partir do espectro de velocidades com a semblance variando o parâmetro w .

Na Seção CMP com 60% de ruído, para $w \in \{1, 3\}$, em geral os eventos sísmicos podem ser visualizados no espectro de velocidade, mas o último deles não tem grande destaque. Com isso, o método automático para identificá-los, descrito na Seção 4.1.2, não é eficaz, já que em ambos os casos o último evento não pôde ser obtido. Além disso, para $w = 1$, foram identificados 5 não eventos, enquanto para $w = 3$ esse valor reduziu para 3. Já usando $w \in \{5, 7\}$, apesar de ter não eventos identificados, todos os eventos sísmicos puderam ser obtidos. Finalmente, para $w =$

9, outra vez o último evento não pode ser identificado, apesar de ele se destacar no espectro de velocidade, pois muitas regiões de não eventos também possuem valores altos de semblance. Aqui, os efeitos negativos de o parâmetro $w = 9$ proporcionar uma janela temporal maior que os pulsos sísmicos da seção CMP é mais expressivo.

Contudo, para $w \in \{1, 3\}$, podemos concluir que a razão sinal/ruído ainda é ruim, enquanto que para $w = 9$ a resolução vertical da velocidade já é muito baixa, já que o tamanho da janela temporal torna-se maior que o tamanho do pulso. Assim, resta analisar quando escolha de w é melhor entre 5 e 7. Em geral, as aproximações são melhores para $w = 5$.

Ademais, com nível de ruído igual 80%, mesmo utilizando a semblance com janela temporal maior, a razão sinal/ruído ainda é baixa no espectro de velocidade e a identificação automática dos eventos é inviável. Por esta razão, a análise para os casos com nível de ruído maior que 60% não foi feita.

5 Conclusão

Ao longo do presente trabalho, discutiu-se a descrição matemática do tempo de trânsito em função do afastamento entre fonte e receptor aproximado como uma hipérbole, bem como a definição da velocidade RMS. Em seguida, relacionamos a este modelo a aquisição dos dados através da configuração CMP, que implica em maior redundância nos registros, bem como, após empilhamento, no aumento da razão sinal/ruído.

Quanto à análise de velocidade de seções CMP, a técnica de processamento de dados sísmicos explorada e implementada foi o cálculo do espectro de velocidade associado à fórmula de Dix, usando a semblance como medida de coerência de sinal, bem como uma forma automatizada de identificar os eventos a partir de tal espectro. Contudo, temos que quanto maior a janela temporal da semblance, maior a razão sinal/ruído, mas também menor é a resolução da velocidade vertical, tendo assim a necessidade de escolher com cautela o comprimento da janela temporal conforme o nível de ruído da seção sísmica.

Para testar as implementações dos métodos de análise de velocidade descri-

tos, bem como validar hipóteses quanto ao tamanho da janela temporal, foram feitos testes sistemáticos em seções CMP sintéticas e com diferentes níveis de ruído, variando o parâmetro w que implica em uma janela temporal de comprimento $2w + 1$. A princípio, observou-se que fixando $w = 5$, temos que as estimativas melhoram com o aumento do nível de ruído, logo a janela temporal da semblance é de fato mais eficiente quando há ruído, já que este é o seu fim. Por outro lado, variando $w \in \{1, 3, 5, 7, 9\}$, temos que quando não há ruído, as estimativas pioram com o aumento de w , de modo que $w = 1$ é a melhor escolha. Com nível baixo de ruído em 20%, a escolha de w é arbitrária, já que todos fornecem aproximações com aproximadamente a mesma qualidade. Com o ruído em 40%, usar $w = 1$ dificulta a análise de velocidade por ainda ter uma razão sinal/ruído baixa, mas para as demais escolhas desse parâmetro os resultados são satisfatórios. Finalmente, para um nível mais alto de ruído em 60%, para $w \in \{1, 3\}$ a razão sinal/ruído ainda é baixa e para $w = 9$ a resolução vertical da velocidade é ruim, logo $w \in \{5, 7\}$ garantem os melhores resultados. Para níveis de ruídos mais altos, o processo de identificação automática não funcionou, uma vez que a razão sinal/ruído não é suficientemente alta para nenhuma escolha de valor para w .

Dessa forma, foi possível obter um melhor entendimento do processo de análise de velocidade através do espectro de velocidade baseado na semblance, bem como obter conclusões satisfatórias a respeito do tamanho da janela temporal da semblance conforme o nível de ruído da seção sísmica. Contudo, automatizar a identificação dos eventos ainda é uma etapa desafiadora para seções com alto nível de ruído, já que mesmo usando técnicas para aumentar a razão sinal/ruído, o método desenvolvido apresenta limitações. Nas próximas etapas, ainda precisam ser efetuados testes com diferentes comprimentos e formatos de ondaleta, bem como com modelos não horizontalmente estratificados.

Referências

- C. Hewitt Dix. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20(1):68–86, 1995. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1438126>.
- Stephen J. Hill and Andreas Rüger. *Illustrated Seismic Processing Volume 1: Imaging*. Society of Exploration Geophysicists, Houston, 2019.
- M. Turhan Taner and Fulton Koehler. Velocity spectra — digital computer derivation and applications of velocity functions. *Geophysics*, 34(6):859–881, 1969. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1440058>.
- Özdoğan Yılmaz. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2000.

Apêndices

A Implementações em Python

```
1 def specvel_semblance(cmp, h, t, vRMS_grid, t0_grid, window_width):
2
3     N = np.size(cmp, 1)    # quantidade de dados coletados pelo receptor/
4     geofone
5
6     M = np.size(cmp, 0)    # numero de tra os s stimos (qtde. de
7     geofones)
8
9     N_vRMS_grid = np.size(vRMS_grid)
10    N_t0_grid = np.size(t0_grid)
11
12    delta_t = t[1] - t[0] # assumindo sinais igualmente amostrados no
13    tempo
14
15    spectrum = np.zeros((N_vRMS_grid, N_t0_grid))
16
17    for n_v in range(N_vRMS_grid): # para cada hip rbole definida pela
18    combina o de vRMS_grid e t0_grid
19        for n_t in range(N_t0_grid):
20
21            S_num = 0    # somas no numerador da semblance
22            S_den = 0    # somas no denominador da semblance
23
24            for pixel in range(-window_width, window_width+1, 1): # para cada
25            hip rbole deslocada, representada pelo deslocamento em pixels
26
27                S_f = 0    # soma da amplitude
28                S_f2 = 0    # soma da amplitude ao quadrado
29
30                for i in range(M): # para cada tra o s smico (geofone)
31
32                    ti = np.sqrt(t0_grid[n_t]**2 + (2*h[i])**2/(vRMS_grid[n_v]**2)
33                    ) + pixel*delta_t # tempo em que h intersec o entre a
34                    hip rbole deslocada e o i- simo tra o s smico
35                    j_ti = int(ti/delta_t)
36
37                    # coordenada temporal mais pr xima captada pelo geofone
```

```

28
29         if j_ti>=0 and j_ti<N-1: # interpola o linear entre
sinais captados no geofone:  $f(t) = b*t + c$ 
30
31         b = (cmp[i, j_ti+1]- cmp[i, j_ti])/delta_t
32         c = cmp[i, j_ti] - b * j_ti
33         f = b*t_i + c
34
35         S_f += f # soma amplitude em t_i obtida por
interpola o linear dos dados registrados no sismograma
36         S_f2 += f**2 # soma amplitude ao quadrado em t_i
37
38         S_num += S_f**2
39         S_den += S_f2
40
41         if S_den==0: spectrum[n_v, n_t] = 0
42         else: spectrum[n_v, n_t] = (1/M)*(S_num/S_den) # semblance
43
44     return spectrum
45
46
47
48 def specvel(cmp, h, t, vRMS_grid, t0_grid, window_width):
49
50     plt.imshow(cmp.T, aspect='auto', extent=[h.min(), h.max(), t.max(), t.
min()])
51     plt.title("Se o CMP", fontweight="bold")
52     plt.xlabel("Meio afastamento (m)")
53     plt.ylabel("Tempo (ms)")
54     plt.colorbar()
55
56     specvel = specvel_semblance(cmp, h, t, vRMS_grid, t0_grid,
window_width)
57
58     plt.show()
59     plt.imshow(np.transpose(specvel), aspect='auto', extent = [vRMS_grid.
min(), vRMS_grid.max(), t0_grid.max(), t0_grid.min()])

```

```

60 plt.title("Espectro de velocidade", fontweight = "bold")
61 plt.ylabel("Tempo de tr nsito em afastamento nulo (ms)")
62 plt.xlabel("Velocidade de empilhamento (m/ms)")
63 plt.colorbar()
64
65 return specvel

```

Listing 1: Espectro de velocidade baseado na semblance.

```

1 def find_interval(vector, start, threshold):
2
3     # Identifica em vector o primeiro intervalo de ndices [a,b] cujos
4     # valores no vector est o acima de threshold a partir do ndice
5     # start
6
7     n = np.size(vector)
8     index = start
9
10    a = None
11    b = None
12
13    while vector[index] <= threshold:
14        index += 1
15        if index >= n: return [a,b]
16
17    a = index
18
19    while vector[index] > threshold:
20        index += 1
21        if index >= n: return [a,b]
22
23    b = index-1
24
25    return [a,b]
26
27 def find_events_intervals(vector, threshold, min_distance):
28

```

```

29 n = len(vector)
30
31 start = 0
32 first_interval = find_interval(vector, start, threshold)
33 end = first_interval[1]
34
35 intervals = [first_interval]
36
37 while end!=None and end!=n:
38     start = end + 1
39     new_interval = find_interval(vector, start, threshold)
40     new_end = new_interval[1]
41
42     if new_interval[0] is not None:           # S        um novo
43         intervalo se a primeira coordenada n o for None
44         if new_interval[0]-end < min_distance: # Se esse novo intervalo
45             for muito pr ximo do intervalo anterior, ent o devem ser tratados
46             como o mesmo intervalo
47             intervals[-1][1] = new_end
48         else:
49             intervals.append(new_interval)
50
51     end=new_end
52
53 return intervals
54
55 def find_events(specvel, cmp, h, t, t0_grid, vRMS_grid, threshold,
56                 min_distance):
57
58     column_max = [max(specvel[:,i]) for i in range(np.size(specvel,1))]
59
60     p = plt.plot(column_max)
61     plt.xlabel("Pixel (em t0)")
62     plt.ylabel("M ximo valor da Semblance")
63
64     intervals = find_events_intervals(column_max, threshold, min_distance)

```

```

62 num_events = len(intervals)
63
64 print("N mero de eventos s smicos identificados:", num_events)
65 print("Intervalos dos eventos s smicos identificados:", intervals)
66
67 t0_events = []
68 vRMS_events = []
69
70 plt.show()
71 plt.imshow(cmp.T, aspect='auto', extent=[h.min(), h.max(), t.max(), t.
72         min()])
73 plt.title("Se o CMP", fontweight = "bold")
74 plt.xlabel("Meio afastamento (m)")
75 plt.ylabel("Tempo de tr nsito (ms)")
76 plt.colorbar()
77
78 grid = np.linspace(h.min(),h.max(),2000)
79
80 for i in range(num_events):
81
82     a = intervals[i][0]
83     b = intervals[i][1]
84     t0_index = np.argmax(column_max[a:b+1]) + a
85     vRMS_index = np.argmax(specvel[:, t0_index])
86
87     t0_events.append(t0_grid[t0_index])
88     vRMS_events.append(vRMS_grid[vRMS_index])
89
90     hiperbole = np.sqrt(t0_events[-1]**2 + 4*grid**2/vRMS_events[-1]**2)
91     plt.plot(grid, hiperbole, c = 'r')
92
93     print("\nCamada ", i+1)
94     print("Velocidade RMS:", vRMS_events[-1], "m/ms")
95     print("Tempo de tr nsito em afastamento nulo:", t0_events[-1], "ms"
96     )
97
98 plt.show()
99 plt.imshow(np.transpose(specvel), aspect='auto', extent = [vRMS_grid.

```

```

    min(), vRMS_grid.max(), t0_grid.max(), t0_grid.min()])
97 plt.title("Espectro de velocidade", fontweight = "bold")
98 plt.ylabel("Tempo de tr nsito em afastamento nulo (ms)")
99 plt.xlabel("Velocidade de empilhamento (m/ms)")
100 plt.colorbar()
101 plt.scatter(vRMS_events, t0_events, c='r')
102
103 return t0_events, vRMS_events

```

Listing 2: Identificação de eventos a partir do espectro de velocidade baseado na semblance.

```

1 def dix(vRMS_events, t0_events, vels, depths, delta_t):
2
3     if vels==[]:
4         delta_t1 = t0_events[-1]/2
5         v1 = vRMS_events[-1]
6
7         vels.append(v1)
8         depths.append(delta_t1 * v1)
9         delta_t.append(delta_t1)
10
11    else:
12        delta_ti = (t0_events[-1]-t0_events[-2])/2
13        vi = np.sqrt((vRMS_events[-1]**2 * t0_events[-1] - vRMS_events
14                    [-2]**2 * t0_events[-2]))/(t0_events[-1]-t0_events[-2]))
15
16        vels.append(vi)
17        depths.append(depths[-1] + delta_ti * vi)
18        delta_t.append(delta_ti)
19
20    def find_vel_depth(vRMS_events, t0_events):
21        delta_t = []
22        vels = []
23        depths = []
24
25        for i in range(len(vRMS_events)):

```

```

26
27     dix(vRMS_events[:i+1], t0_events[:i+1], vels, depths, delta_t)
28
29     print("Camada ", i+1)
30     print("Velocidade de propagação:", vels[-1], "m/ms")
31     print("Profundidade da camada:", depths[-1], "m\n")
32
33     return vels, depths, delta_t

```

Listing 3: Identificação da profundidade e velocidade de propagação da onda nos meios através da Fórmula de Dix.