

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO SINAL DO GPR NA DEFINIÇÃO DE AMBIENTES
COSTEIROS**

CAROLINA GONÇALVES LEANDRO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

Volume I

Porto Alegre – 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO SINAL DO GPR NA DEFINIÇÃO DE AMBIENTES
COSTEIROS**

CAROLINA GONÇALVES LEANDRO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Thaís Baptista da Rocha - UFF

Prof. Dr. Jairo Francisco Savian - UFRGS

Prof. Dr. Everton Frigo - UNIPAMPA

Dissertação de Mestrado
apresentada como requisito
parcial para a obtenção do
Título de Mestre em
Geociências.

Porto Alegre – 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Lopes, Camila Trindade

Possíveis causas de atenuação do sinal do Radar de Penetração no solo - GPR na região norte do Banhado do Taim extremo sul do Brasil / Camila Trindade Lopes. -- 2018.

74 f.

Orientador: Eduardo Guimarães Barboza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Processamento de GPR. 2. Camada guia de onda.
3. Planície Costeira. I. Barboza, Eduardo Guimarães, orient. II. Título.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê”

(Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Agradecer é uma forma de reconhecer a ajuda, o apoio e o incentivo de todas as pessoas que colaboraram, de uma forma ou de outra, para que essa dissertação se concretizasse.

Gostaria de começar agradecendo a minha família, meus pais Luiz Antônio e Denize, meu irmão Rodrigo e meu companheiro Tobias. Obrigada pelo amor e incentivo que sempre encontro em vocês, obrigada pela dedicação e estrutura que vocês me proporcionam para que eu possa ir atrás dos meus sonhos, obrigada por serem a minha torcida mais fiel e por dividirem comigo todas as alegrias e angústias que eu tive durante o caminho.

Agradeço ao professor Eduardo Barboza, pela orientação, pela oportunidade de trabalhar com os dados do Grupo de Pesquisas em Sismoestratigrafia da UFRGS, pelas discussões científicas e por me incentivar a provar minha capacidade.

Agradeço aos professores que compõe a banca examinadora, por aceitarem avaliar e contribuir com a minha dissertação.

Agradeço aos Felipes, que foram de fundamental importância para que eu concluísse o artigo e conseqüentemente a minha dissertação. Obrigada professor Felipe Caron por me guiar quando eu me perdia, pelas valiosas sugestões e por sempre me estimular a seguir em frente. Obrigada ao colega geofísico Felipe Augusto de Jesus pela paciência e dedicação com que me ensinou o processamento dos dados e pela atenção e auxílio sempre que eu solicitei.

Agradeço as minhas parceiras de vida portoalegrense Camila Trindade Lopes e Taís Cordeiro de Lima. Camila, obrigada por dividir cada momento do mestrado comigo, obrigada parceria nos campos, estudos, viagens, tua amizade foi um presente. E a Tatá, obrigada pela paciência e auxílio na elaboração dos meus mapas, obrigada pelas conversas e por me divertir no nosso convívio diário.

Agradeço a todos os colegas do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO), por compartilharem conhecimentos, conversas e informações. Um obrigada em especial a colega Maiara Bettinelli pela ajuda sempre que solicitada.

Agradeço a todos os professores da instituição que fizeram parte da minha vida de mestrandia, em especial ao professor Jairo, pela amizade, pelas conversas que sempre me incentivaram e por acreditar no meu potencial.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos que sempre mandam energia positiva e torcem pelo meu sucesso.

Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos concedida e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o CECO pela infraestrutura disponibilizada.

RESUMO

Na barreira regressiva da Pinheira, são reconhecidos quatro ambientes deposicionais costeiros, caracterizados por parâmetros geológicos como a análise de litofácies, estruturas sedimentares, grau de compactação e conteúdo de moluscos. Informações que são analisadas em conjunto com imagens de dados geofísicos obtidas com o método do Radar de Penetração no Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*) para determinar esses ambientes. O presente trabalho visa a caracterização destes ambientes deposicionais através da análise da amplitude do sinal em traços de antenas com frequências centrais de 80, 100, 200 e 400 MHz em conjunto com os dados de compactação e litológicos de um furo de sondagem. E também mostra o comportamento da atenuação do sinal em relação a umidade presente no ambiente. A análise dos traços permitiu a identificação dos contatos entre os ambientes já descritos para barreiras regressivas, mostrando variação no valor das amplitudes (decréscimo ou aumento) em conjunto com a variação no grau de compactação, que evidenciam em subsuperfície a mudança entre os ambientes de cordões litorâneos, *backshore/foreshore* e *shoreface* superior e inferior. A interferência da umidade na atenuação do sinal nos dados analisados pode ser observada apenas nos primeiros 0,5 m. Demonstrando que a pluviosidade não é um fator de relevância para atenuação do sinal em ambientes arenosos onde o nível da água é próximo a superfície. A análise dos radargramas para todas as antenas, permitiu a identificação dos padrões de refletores já descritos para os ambientes da área de estudo e a antena com frequência central de 200 MHz apresentou maior resolução para a definição de todos os ambientes.

Palavras-chave: processamento de dados de GPR, análise do traço, atenuação do sinal, barreira regressiva.

ABSTRACT

In the Pinheira regressive barrier, four coastal depositional environments are recognized, characterized by geological parameters such as lithofacies analysis, sedimentary structures, compaction degree and set of mollusks. Information that is analyzed together with images of geophysical data obtained with the Ground Penetrating Radar (GPR) method to determine these environments. The present work aims to characterize these depositional environments by analyzing the signal amplitude in traces with central frequencies antennas of 80, 100, 200 and 400 MHz in conjunction with the compaction and lithological data of a drill hole. It also shows the behavior of signal attenuation in relation to the humidity present in the environment. The analysis of the traces allowed the identification of the contacts between the environments already described for regressive barriers, showing variation in the value of the amplitudes (decrease or increase), together with the variation in the degree of compaction, which evidences in subsurface the change between the environments of foredune ridges, backshore/foreshore and upper and lower shoreface. The interference of humidity in attenuation of the signal in the studied data can be observed only in the first 0.5 m. Rainfall was not relevant for signal attenuation in the studied sandy deposits with water level close to the surface. The analysis of the radargrams for all the antennas allowed the identification of the patterns of reflectors already described for the environments of the study area and the central frequency antenna of 200 MHz showed the highest resolution for the definition of all the environments.

Keywords: GPR data processing, trace analysis, signal attenuation, regressive barrier.

SUMÁRIO

Texto explicativo sobre a estrutura da dissertação	10
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.1 Introdução.....	11
1.2 Área de estudo	12
1.3 Contexto geológico.....	13
1.4 Aspectos climatológicos e oceanográficos.....	16
1.5 Materiais e métodos.....	17
1.5.1 O método do radar de penetração no solo (GPR).....	17
1.5.1.2 A interação das ondas eletromagnéticas com o meio	18
1.5.1.3 Registro do sinal do GPR.....	20
1.5.2 Furo de sondagem FS 31	22
1.6 Aquisição e processamento dos dados de GPR	23
1.6.1 Seleção do traço para análise e determinação da constante de atenuação	36
1.6.2 Interpretação das radarfácies	37
1.7 Referências.....	41
2 CORPO PRINCIPAL – ARTIGO SUBMETIDO.....	46
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
ANEXO	74

Texto explicativo sobre a estrutura da dissertação

A presente Dissertação está dividida em três capítulos principais e uma seção de anexos.

No Capítulo 1, estão presentes as *Considerações Iniciais*, possuindo sete subdivisões: *Introdução*, mostrando a contextualização do problema, os principais objetivos e a importância do estudo para o entendimento dos ambientes deposicionais costeiros a partir do método utilizado. *Área de estudo*, mostrando a localização da Planície Costeira da Praia da Pinheira, seus limites e principal via de acesso. *Contexto Geológico*, onde foram descritas as principais características da geologia da barreira regressiva da Pinheira. *Aspectos climatológicos e oceanográficos*, onde estão descritas as principais características do clima, ondas e marés e da deriva litorânea da área de estudo. *Materiais e Métodos* contendo uma breve descrição sobre o método empregado, a interação das ondas eletromagnéticas com o meio e como o sinal do GPR é registrado. Neste item também consta as informações do furo de sondagem. No item *Aquisição e processamento dos dados* são apresentados os parâmetros das aquisições e as etapas de processamento realizadas para definição dos traços e para a interpretação das radarfácies. Nas *Referências* encontram-se os trabalhos citados no texto do primeiro capítulo.

O Capítulo 2 compõe o *Corpo Principal* da Dissertação, com a versão integral do artigo intitulado, **GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil**, submetido ao *Journal of Applied Geophysics*.

No Capítulo 3 estão as *Considerações Finais*, onde são expostos os principais resultados e conclusões obtidas no estudo.

Em *Anexo* encontra-se a carta confirmando o recebimento do artigo submetido.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Zonas costeiras são ambientes dinâmicos que resultam da disponibilidade e do transporte de sedimento, da hidrodinâmica e das variações morfológicas locais (COWELL & THOM, 1994). As mudanças no ambiente costeiro ocorrem em diferentes escalas de tempo, de instantes a milênios, ficando muitas vezes impressas nas feições morfológicas das regiões litorâneas, particularmente, das planícies costeiras (COWELL & THOM, 1994). As flutuações do nível do mar, resultantes das mudanças climáticas durante o Holoceno, foram de fundamental importância para a formação das planícies costeiras brasileiras.

Os cordões litorâneos são feições típicas de planícies costeiras que passaram por eventos de progradação da costa, através da adição sucessiva de cordões de praias ou dunas (OTVOS, 2000). A planície costeira da Praia da Pinheira, no litoral centro-sul do Estado de Santa Catarina, trata-se de um excelente registro de cordões arenosos formados durante o Holoceno, por meio da progradação sucessiva da linha de costa em formato de praias de enseada (HEIN *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, diversos estudos sobre a gênese e as interpretações de ambientes deposicionais dos cordões litorâneos estão sendo desenvolvidos nas planícies costeiras do sul do Brasil. No estado de Santa Catarina os estudos relacionados a evolução da planície costeira são mais atuais, onde se destacam os trabalhos de Barboza *et al.* (2009, 2011, 2014a), Hesp *et al.* (2009), Fornari (2010), Tanaka (2010), Biancini *et al.* (2010, 2014), Biancini (2011), Dillenburg *et al.* (2011, 2014), Hein *et al.* (2013), Cooper *et al.* (2018).

No entanto, a maioria desses estudos utiliza apenas parâmetros geológicos como a análise de litofácies, estruturas sedimentares, grau de compactação e conteúdo fossilífero para interpretar e definir os ambientes deposicionais dessas regiões. Essas informações litológicas são analisadas em conjunto com imagens de dados geofísicos obtidas com o método do Radar de Penetração no Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*).

Este estudo concentrou-se na análise do sinal de dados geofísicos utilizando o método GPR, obtidos na barreira regressiva da Praia da Pinheira. Visando

a caracterização dos ambientes deposicionais costeiros a partir da análise de traços de levantamentos realizados com diferentes antenas de frequências centrais (80, 100, 200 e 400 MHz), e correlacionados com o grau de compactação obtido através de testemunho de sondagem.

1.2 Área de estudo

A Planície Costeira da Praia da Pinheira está localizada na porção centro-sul, ou setor IV do Estado de Santa Catarina (HORN FILHO, 2003), no município de Palhoça, próximo à porção sul da Ilha de Santa Catarina (Figura 1). Região correspondente a carta Paulo Lopes – SG 22-ZD-V-4/VI-3 (IBGE) e a carta náutica Canal Sul da Ilha de Santa Catarina - 1904. Composta por uma enseada simétrica com aproximadamente 8,5 km de extensão e 5,2 km de largura.

A área da Praia da Pinheira é limitada, ao norte, pela Baía Sul, ao oeste, pelas Serras Cristalinas (Monteiro, 1958), componentes das Serras do Leste Catarinense (Complexo Tabuleiro); ao sul, pelos promontórios rochosos da Ponta da Velha Alexandra (interno) e a Ponta da Pinheira ou das Andorinhas (externo) que compõem o Costão da Pinheira; ao leste, pelo oceano Atlântico. Nas regiões adjacentes a planície da Praia da Pinheira encontram-se duas planícies fluviais, as dos rios Maciambú e da Madre, ao norte e ao sul respectivamente. Seu principal acesso dá-se através da rodovia BR-101, e dista cerca de 50 km ao sul de Florianópolis.

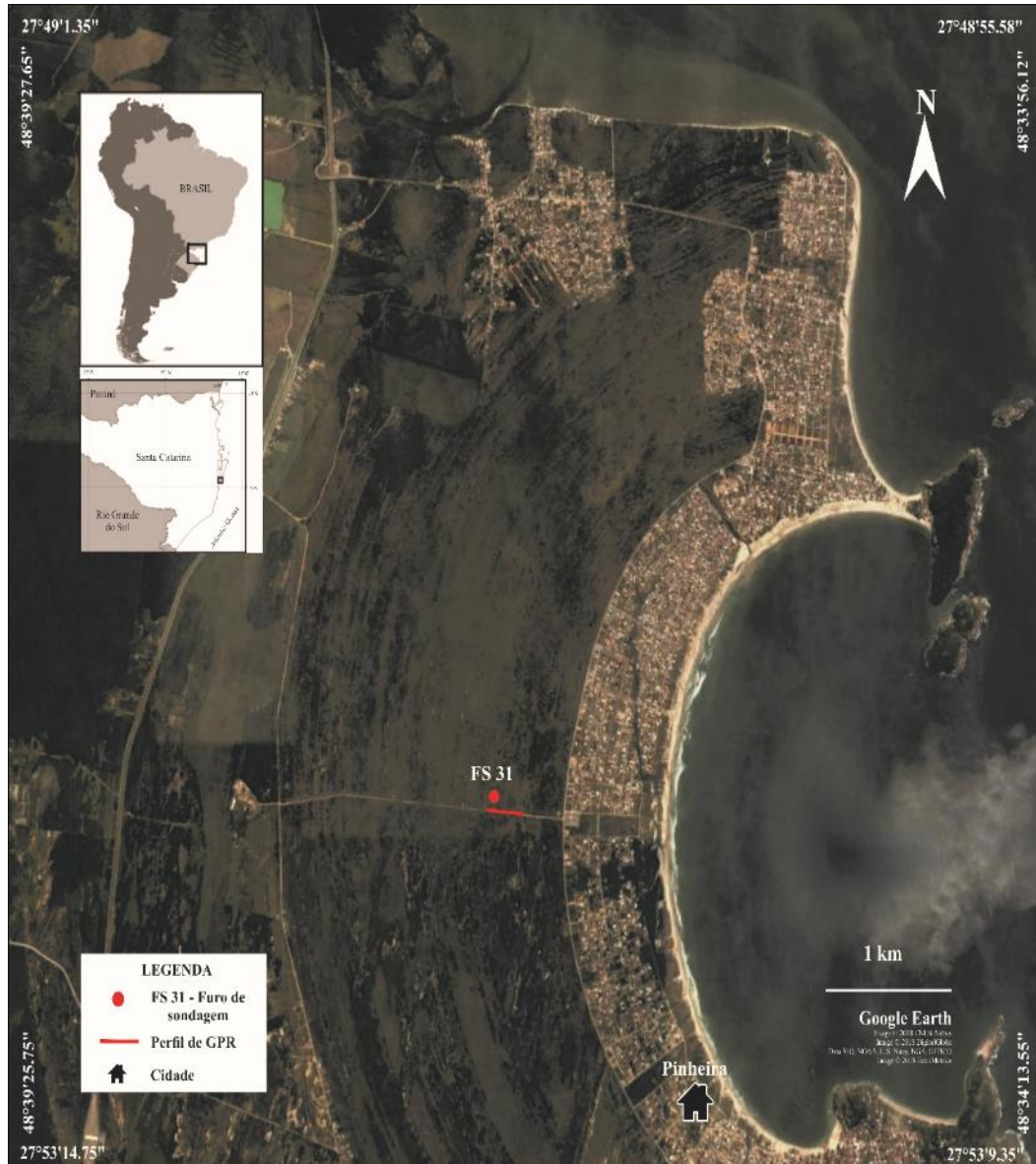


Figura 1: Localização da área de estudo, do perfil de GPR e do furo de sondagem FS 31. (Imagem de satélite base obtida do Google™ Earth, 2017).

1.3 Contexto geológico

A barreira regressiva da Praia da Pinheira (Figura 2) faz parte do setor norte da Bacia de Pelotas, uma bacia sedimentar marginal com aproximadamente 40.000 km² de área emersa (DIAS, 1994). A planície costeira, na área de estudo, é formada por um sistema de leques aluviais e pela justaposição lateral de dois sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira. Esses tipos de sistemas deposicionais costeiros foram, primeiramente, definidos para o Rio Grande do Sul (RS) por Villwock *et al.* (1986). Estes dois sistemas laguna-barreira de idades pleistocênicas e holocênicas,

são identificados por Dillenburg *et al.* (2014) como Barreira III e Barreira IV, análogos aos sistemas definidos para o RS. Cada sistema laguna-barreira está relacionado como uma sequência deposicional de alta frequência (Rosa *et al.*, 2011; 2017). A barreira regressiva da Praia da Pinheira possui a geometria de um embaçamento simétrico e arqueado, que se estende através de 180° de curvatura (Dillenburg *et al.*, 2011). Essa região junto ao Alto de Florianópolis está localizada ao norte do maior embaçamento costeiro da Bacia de Pelotas – Tramandaí/Cabo de Santa Marta (DILLENBURG & BARBOZA, 2014).

De acordo com Angulo *et al.* (1999, 2006), o comportamento do nível do mar para a região da Praia da Pinheira após o último máximo glacial, há aproximadamente 18 ka AP, inicia com uma rápida subida até ultrapassar o nível atual por volta de 7 ka AP. A partir de então, passou a subir de forma lenta atingindo seu nível relativo máximo de 2 a 3 m acima do atual, entre 6 e 5 ka AP, e a partir de 4 ka AP inicia uma queda até os dias atuais.

Dillenburg *et al.* (2011) descreveram através da análise de radarfácies em conjunto com os dados litológicos identificados no furo de sondagem FS 31, uma sucessão vertical de fácies granocrescente, que compreende:

- i. Fácies da *shoreface* inferior (D): areia com compactação muito baixa, cinza escura, moderadamente a pouco selecionada, fina e quartzosa, com 20 a 30% de lama e a presença de fragmentos e conchas bem preservadas das espécies marinhas: *Nucula semiornata*, *Macra sp.*, *Pitar sp.*, *Olivella sp.*, e *Donax sp.* É marcado por refletores contínuos, sub-paralelos e de baixo ângulo nos registros de GPR.
- ii. Fácies da *shoreface* superior (C): areia moderadamente compactada, cinza esverdeada, fina e quartzosa, com pequenas concentrações de conchas marinhas bem preservadas, como: *Macra patagonica*, *Macra sp.*, *Pitar sp.* e *Littoridina australis*. Os refletores no GPR são ondulados, não contínuos e apresentam um padrão côncavo/convexo.
- iii. Fácies do *backshore/foreshore* (B): areia altamente compactada, cinza esverdeada, moderadamente selecionada, quartzosa e fina, com concentrações de fragmentos de moluscos dispersos ou na forma de lâminas, mostrando laminação plano paralela e de baixo ângulo. Os refletores no GPR são contínuos, sub-paralelos e de baixo ângulo.

- iv. Fácies dos cordões litorâneos e cavas (A): areia muito pouco compactada, branca, bem selecionada, quartzosa fina, mostrando uma laminação plano-paralela insipiente, com alguma lama e turfa nas cavas bem desenvolvidas. Os registros de GPR mostram refletores de alto ângulo, ondulados e não contínuos para os cordões e transparentes e de baixo contraste para os refletores das cavas.

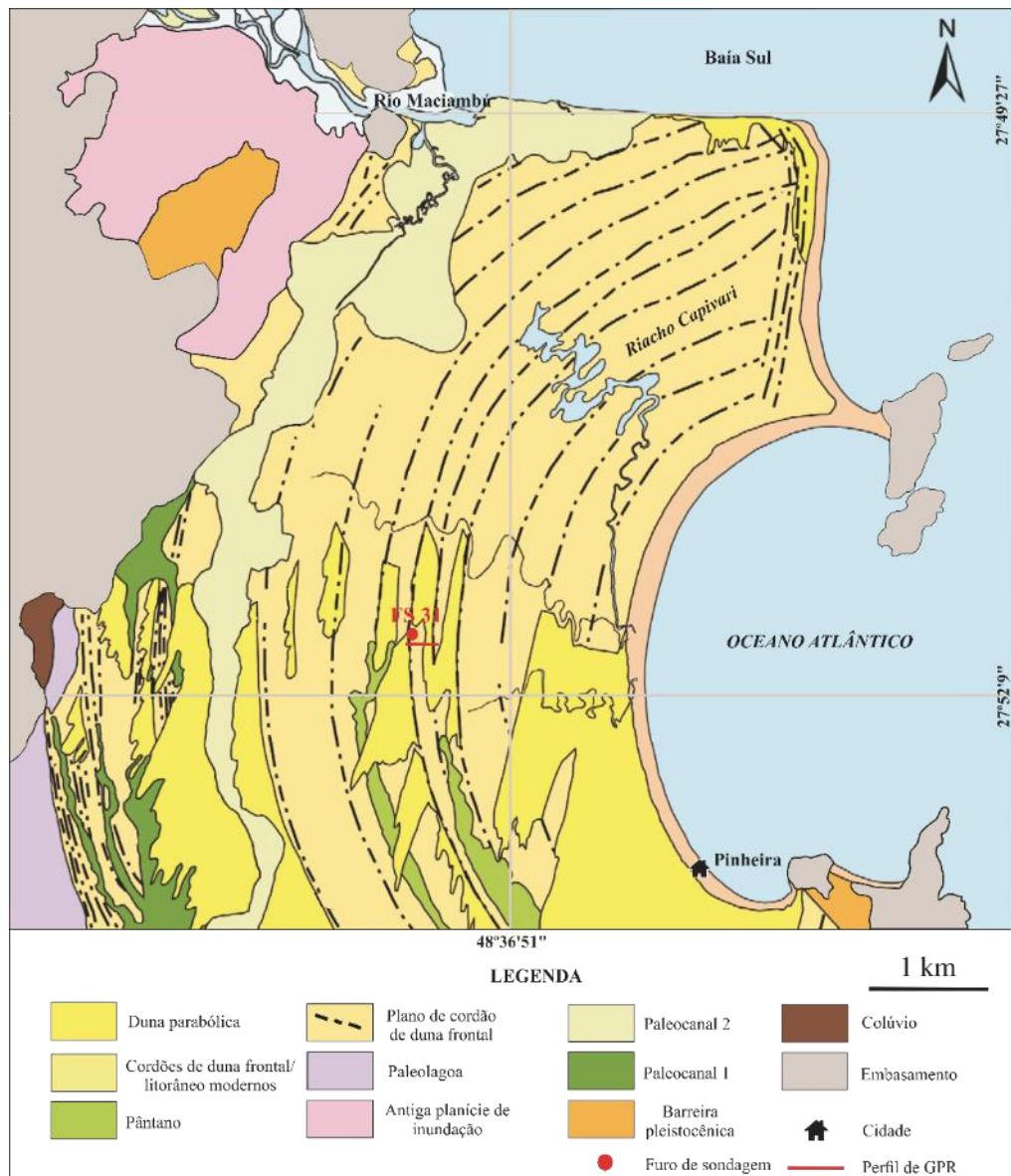


Figura 2: Mapa geológico/geomorfológico e localização da barreira regressiva da Pinheira, mostrando também a localização do perfil de GPR e o furo de sondagem. (Modificado de DILLENBURG *et al.*, 2014).

1.4 Aspectos climatológicos e oceanográficos

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é subtropical constantemente úmido (Cfa), sem estação seca, com verão quente (Alvares *et al.*, 2014). A precipitação anual média é entre 1.600 e 1.900 mm, com valores máximos encontrados nos meses de verão e os mais baixos no inverno. A temperatura média anual varia entre 20 e 22°C.

O litoral catarinense está inserido em uma região de micro maré com regime predominantemente semidiurno. As ondas de maré possuem altura média de 0,8 m com amplitude máxima de 1,2 m (SCHETTINI *et al.*, 1996; TRUCOLLO, 1998). A partir dessas características, a costa de Santa Catarina foi classificada como uma costa dominada por ondas (DAVIS & HAYES, 1984), apresentando os maiores efeitos da maré quando ocorrem eventos meteorológicos (CRUZ, 1993).

A classificação morfodinâmica da praia da Pinheira foi realizada por diferentes autores. Klein *et al.* (2005) e Silveira *et al.* (2011), classificaram como uma praia em estado dissipativo, que recebe alta energia de onda (aproximadamente 2,5m), possuindo sedimentos finos, zona de surfe com múltiplos bancos e uma larga zona de espraiamento (SHORT, 1999). Para Pacheco (2015) e Klein *et al.* (2016) a praia da Pinheira é classificada como intermediária em estágio de terraço de baixamar, que se encontra entre o estado dissipativo e refletivo com energia de onda moderada a alta (0,5 a 2,5m), a areia varia de fina a média, possuindo bancos submersos, cúspides e correntes de retorno (SHORT, 1999).

Silva (2016) realizou o mapeamento dos cordões arenosos e identificou 100 cordões dentro de 4 km da planície, com largura média de 24 m e com período de formação entre 30 a 60 anos, de acordo com a taxa de progradação que regia a planície no período. De acordo com Silva (2016) a progradação da planície da Pinheira ocorreu de forma gradativa a partir do meio do Holoceno até a atualidade. A variação observada na taxa de progradação dos cordões arenosos foi entre 0,4 a 1,3 m/ano. A linha de costa seco-molhada e da base da duna frontal dentro do último século apresentaram progradação média de 1,2 e 2,2 m/ano, respectivamente, estas variações na taxa de progradação foram atribuídas aos efeitos da circulação costeira.

1.5 Materiais e métodos

Neste item será apresentado um breve histórico do método GPR, assim como a discussão da interação das ondas eletromagnéticas com o meio, e como o registro do sinal do GPR é realizado. Também são apresentadas as informações sobre o furo de sondagem FS 31.

1.5.1 O método do radar de penetração no solo (GPR)

Uma das mais importantes contribuições para a evolução da ciência proporcionada por James Clerk Maxwell foi o desenvolvimento da teoria eletromagnética. No ano de 1864, utilizando-se de conhecimento já existente como as leis de Faraday, Ampère, Coulomb e Gauss, Maxwell obteve matematicamente as relações que expressam a interação dos campos elétricos e magnéticos (CISNEROS, 2001).

A primeira descrição do uso de ondas eletromagnéticas para localização de objetos enterrados foi realizada em uma patente alemã (Leimback & Lowy, 1910 *apud* Daniels, 1996) através da transmissão de ondas contínuas e o primeiro levantamento de GPR foi realizado em 1929 para a determinação da espessura de uma geleira (STERN, 1929 *apud* OLHOEFT, 1996).

Durante a Segunda Guerra Mundial, teve como objetivo localizar armas, bombas e galerias subterrâneas. O interesse foi renovado na década de 70 devido ao progresso nas investigações lunares (DANIELS, 2004) e tornaram-se mais frequentes trabalhos de Engenharia, Arqueologia e Geologia.

Em 1972, é dado o lançamento do GPR no mercado, através, da criação da empresa norte americana, *Geophysical Survey System Inc. (GSSI™)*, por R. Morey e A. Drake, (MOREY, 1974) e desde então, começaram a surgir muitas publicações demonstrando os resultados em estudos geológicos, especialmente os relacionados à pesquisa de sistemas deposicionais e a sedimentologia (JOL & BRISTOW, 2003; NEAL, 2004; BAKER & JOL, 2007). Atualmente, tem sido aplicado nos estudos de evolução costeira e na análise estratigráfica de barreiras holocênicas do litoral da região sul do Brasil (BARBOZA *et al.*, 2009, 2011ab, 2013, 2014a; BIANCINI DA SILVA *et al.*, 2010, 2014; DILLENBURG *et al.*, 2011, 2014, 2017; ROSA, 2012, ROSA

et al., 2016, 2017). Possibilitando a visualização da arquitetura deposicional e estratigráfica dos depósitos em subsuperfície, viabilizando a interpretação evolutiva de processos ocorridos, e colaborando para o melhor entendimento do comportamento evolutivo das barreiras costeiras.

O método do GPR utiliza ondas eletromagnéticas que operam na faixa de frequência de rádio a micro-ondas, variando desde MHz até GHz (NEAL, 2004), com objetivo de investigar a subsuperfície. Sua aplicação consiste em efetuar medidas, posicionando um transmissor e um receptor com uma geometria fixa, que serão movidos ao longo de uma superfície. O pulso eletromagnético é enviado por uma antena transmissora se propagando pelo subsolo até encontrar um horizonte com contraste nas propriedades elétricas. Esses contrastes devem-se geralmente a variação no conteúdo de água, relacionada com os tipos de sedimentos, granulometria, porosidade e compactação (JOL & BRISTOW, 2003). Desta maneira, parte da energia é refletida para a superfície e parte é transmitida, se propagando em subsuperfície. A onda refletida é recebida pela antena receptora, amplificada, digitalizada e armazenada na memória da unidade controladora (JOL, 2009).

1.5.1.2 A interação das ondas eletromagnéticas com o meio

As propriedades dos materiais que controlam o comportamento da propagação das ondas eletromagnéticas em um meio são: a permissividade dielétrica (ϵ), condutividade elétrica (σ) e a permeabilidade magnética (μ). São as variações nessas propriedades que fazem com que parte do sinal seja refletido e refratado.

O GPR trabalha com a detecção do sinal refletido por diferentes interfaces, como o sinal emitido é uma onda eletromagnética, espera-se que ele obedeça às teorias clássicas do eletromagnetismo e da ondulatória. Deste modo, é possível descrever matematicamente a trajetória do sinal com a Lei de Snell:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{v_2} \quad (1)$$

onde, θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e reflexão, respectivamente; e v_1 e v_2 as velocidades de incidência e reflexão.

A velocidade (v) de uma onda eletromagnética pode ser escrita em função da sua frequência (f), velocidade da onda eletromagnética no vácuo (c), e da média relativa da constante dielétrica do meio (ϵ_r), da permeabilidade magnética relativa (μ_r) e condutividade elétrica (σ):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}}{2}}} \quad (2)$$

onde, $\sigma/\omega\epsilon$ é o fator atenuante; e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (rad/s).

Em materiais de fator atenuante baixo, como areia limpa e cascalho, a influência da condutividade elétrica (σ) sobre o leque de frequências do GPR é mínima. Assim, pode-se assumir que $\sigma/\omega\epsilon = 0$ (NEAL, 2004). E como a influência da permeabilidade magnética relativa (μ_r) no sinal é pouco conhecida, atribui-se $\mu_r = 1$, desta forma a equação (2) pode ser descrita de forma simplificada:

$$v = \frac{c}{\epsilon_r} \quad (3)$$

Assim como nas ondas sísmicas, as ondas eletromagnéticas a medida que se propagam através de um meio, ocorre espalhamento geométrico, absorção e atenuação da energia. O espalhamento geométrico (ou esférico) é a diminuição da força da onda (energia por unidade de área de frente de onda) com a distância, como resultado da propagação da energia da onda em todas as direções da sua fonte (BURGUER *et al.*, 2006). A atenuação é a diminuição da intensidade de uma onda como resultado da absorção de energia e dispersão para fora do caminho da antena receptora, mas não inclui a redução da intensidade devido ao espalhamento geométrico.

A atenuação é uma perda de energia por ciclo. As frequências mais elevadas têm um número maior de ciclos em uma quantidade de tempo, se comparadas com as baixas frequências, de modo que as altas frequências são atenuadas de forma mais rápida do que as baixas frequências transmitidas através do mesmo material (BURGUER *et al.*, 2006). A atenuação não é uma questão importante para muitos métodos eletromagnéticos, porque o comprimento de onda das ondas é muito maior que a distância entre o transmissor e o receptor, porém, é um fator importante nas altas frequências da prospecção com GPR.

Esta atenuação ocorre de maneira exponencial, e pode ser expressa matematicamente pela relação entre a amplitude final (A), a amplitude inicial (A_0) e a distância percorrida (z):

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (4)$$

Onde α é a constante de atenuação. Essa constante independe da frequência do ponto de vista de materiais de fator de atenuante baixo, sendo assim:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5)$$

Assim, é possível notar que a condutividade elétrica (σ) é diretamente proporcional a constante de atenuação (α) do meio.

Baseado nas definições das equações (4) e (5), uma série de postulações podem ser inferidas, tais como: materiais que possuem alta condutividade elétrica terão um fator de atenuação alto, como por exemplo a água salgada e a argila.

Dentre todas as formas de perda de energia, a atenuação α é a mais importante, ela está ligada diretamente as propriedades eletromagnéticas e dielétricas do meio de propagação.

1.5.1.3 Registro do sinal do GPR

Ao ser aplicada uma voltagem alternada nos condutores de uma antena transmissora, a energia é transferida para os elétrons (cargas livres), que são acelerados, produzindo um feixe de ondas eletromagnéticas. A antena transmissora gera um trem de onda, que se propaga na forma de um feixe cônico a uma velocidade determinada principalmente pelas propriedades dielétricas do meio. Parte do sinal se propaga pelo ar, e a outra parte, pelo meio de interesse. Ao encontrar uma interface com diferença nas propriedades eletromagnéticas, o sinal emitido irá refletir e será recebido por uma antena receptora, colocada na superfície a uma distância constante da antena transmissora. O sinal refletido é registrado em função do tempo duplo de percurso (*two-way travel time* – *TWT*), e do intervalo de amostragem. O *TWT* é o tempo decorrido entre a transmissão do sinal, sua reflexão e sua captação, no caso do GPR este tempo é medido em nanosegundos (10^{-9} s) (NEAL, 2004).

O sinal captado no traço do GPR não resulta exclusivamente das reflexões registradas da subsuperfície. A onda aérea (*air wave*) é o primeiro pulso a ser registrado pela antena (Figura 3), que viaja da antena transmissora para receptora na velocidade da luz ($\sim 0,3$ m/ns); e a onda de superfície (*ground wave*), é a segunda onda que chega na antena receptora (Figura 3), viajando diretamente pela superfície do transmissor ao receptor.

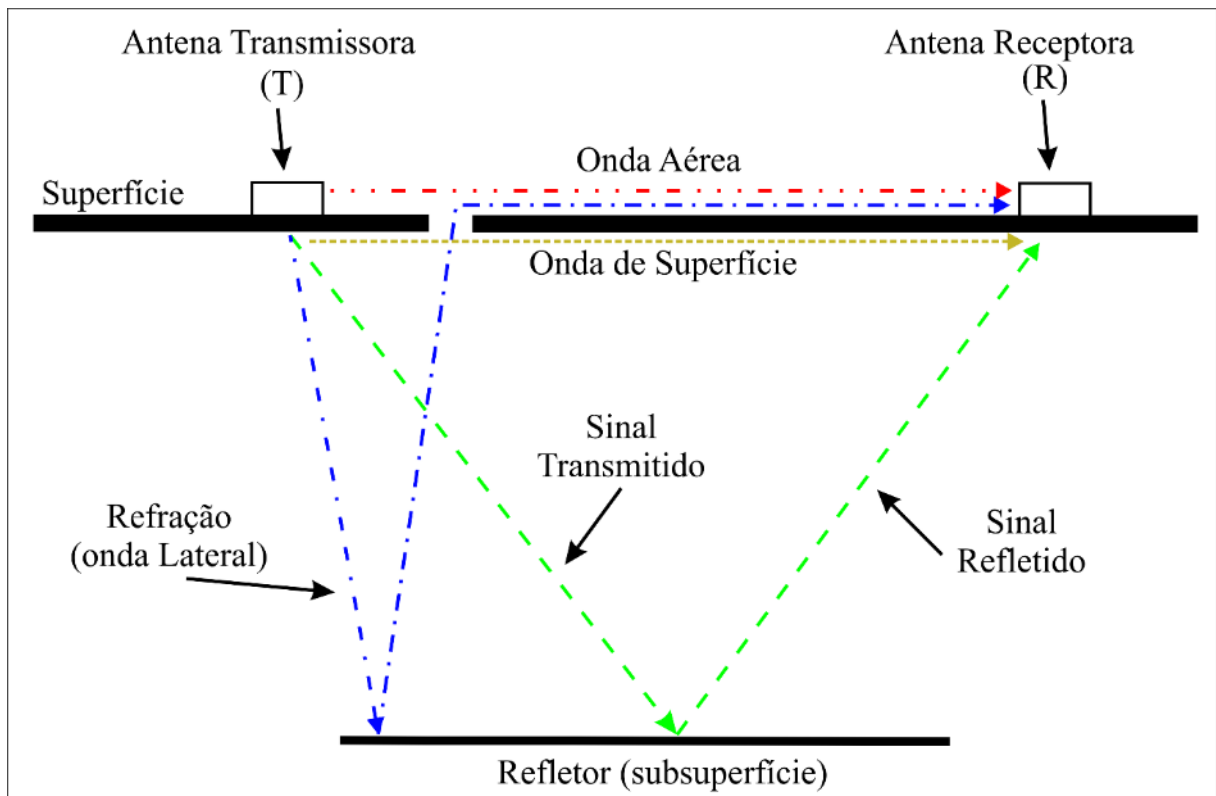


Figura 3: Trajetória das ondas transmitidas e recebidas pelas antenas. (Modificado de NEAL, 2004).

O traço representa a resposta do GPR em cada ponto do terreno amostrado (Figura 4), e refletem a resposta da propagação da onda eletromagnética no subsolo. A propagação da onda varia de acordo com o comportamento dielétrico do meio em que o sinal se propagou. Quanto maior a amplitude do sinal registrado maior será o contraste elétrico entre os meios investigados. O resultado de um perfil de GPR então será uma imagem das variações em subsuperfície das propriedades elétricas em função do TWT do pulso eletromagnético. O imageamento da subsuperfície é representado por todos os traços gravados, formando o que se denomina radargrama.

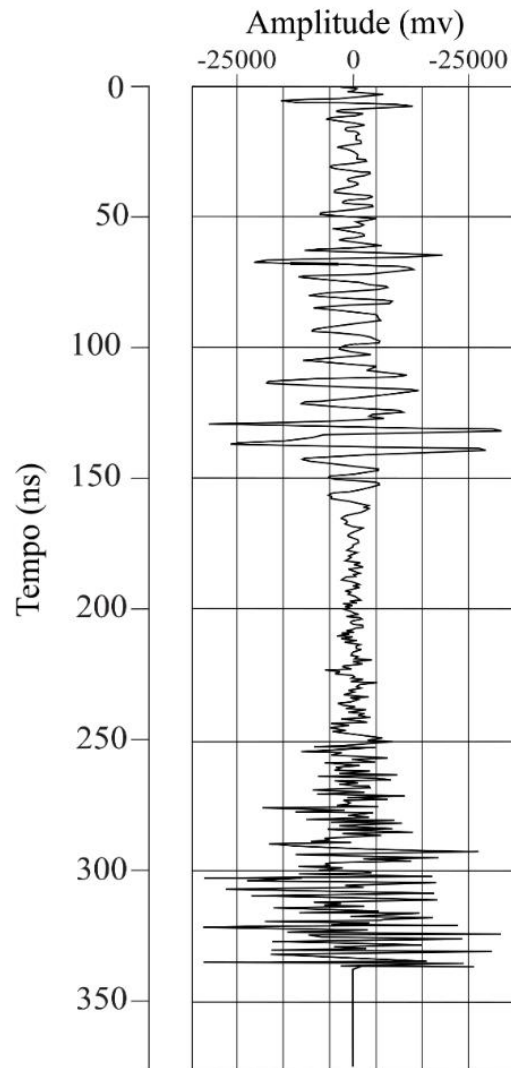


Figura 4: Representação de um traço, mostrando a variação da amplitude em função do tempo.

1.5.2 Furo de sondagem FS 31

O furo de sondagem FS 31 foi realizado pela empresa Fundasolos no dia 27/03/2007. O furo está localizado na parte média da barreira regressiva da Praia da Pinheira, e realizado por um sistema de perfuração de percussão (SPT - Teste de Penetração Padrão), que permite a determinação do grau de compactação das litologias perfuradas. O sistema SPT recupera um pequeno cilindro de amostra (15 a 45 cm de comprimento e 0,38 cm de diâmetro) a cada 1 m de penetração de perfuração.

As informações obtidas no furo de sondagem foram o grau de compactação, assumido a partir do número de golpes para penetração de 30 cm do

amostrador, a descrição dos depósitos sedimentares presentes em cada ambiente, e a informação sobre nível inicial d'água (Dillenburg *et al.*, 2011). No primeiro dia de sondagem, o nível d'água não foi encontrado até os 2 m de profundidade e, após 24h, o nível d'água foi encontrado aos 3,1 m de profundidade. Este parâmetro foi utilizado na análise do sinal, pois a saturação de água no meio influencia diretamente na propagação e atenuação do sinal da onda de radar.

1.6 Aquisição e processamento dos dados de GPR

As seções de GPR utilizadas no trabalho fazem parte de um banco de dados levantados pelo Grupo de Pesquisas em Sismoestratigrafia da UFRGS desde o ano de 2006. Foram utilizados nos levantamentos dois sistemas de aquisição de dados de fabricantes distintos, um sistema da GSSI™ (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), composto por um coletor de dados SIR-3000 em conjunto com antenas de contato com frequências centrais de 100, 200 e 400 MHz também fabricadas pela GSSI™. O outro sistema utilizado foi o Cobra Plug-In GPR (Radarteam Sweden AB) com uma antena aérea SUBECHO SE-70, com frequência central de 80 MHz.

A aquisição foi realizada com arranjo *Common Offset* monoestático, conforme Barboza *et al.* (2014b). A profundidade das janelas variou de 1.000 a 350 ns e cada traço da seção representa o empilhamento de 32 leituras (*stacking*).

Todas as seções foram adquiridas em uma estrada não asfaltada, com orientação perpendicular a maior extensão dos cordões de dunas frontais, em alto ângulo com a linha de costa. As aquisições ocorreram em épocas distintas, as campanhas utilizadas no trabalho ocorreram em julho de 2009 e 2010, agosto de 2012 e fevereiro e dezembro de 2016.

Como os dados não têm o mesmo tamanho espacial e temporal, uma rotina de processamento com o software Reflex-Win® foi realizada para que os perfis de GPR fossem organizados de forma a serem comparados. Os parâmetros de aquisição para cada perfil são apresentados na Tabela 1. Para a seleção dos traços utilizados na análise dos ambientes deposicionais, o processamento dos dados seguiu os passos apresentados no fluxograma a seguir (Figura 5).

Tabela 1: Parâmetros de aquisição.

Perfil	Frequência central da antena (MHz)	Número de traços	Número de amostrar no traço	Janela de tempo (ns)	Incremento espacial (m)
a	80	1520	512	500	0,3887
b	80	6247	512	1000	0,3930
c	100	5542	2048	500	0,1000
d	200	14676	1024	400	0,1000
e	400	17446	1024	350	0,1000

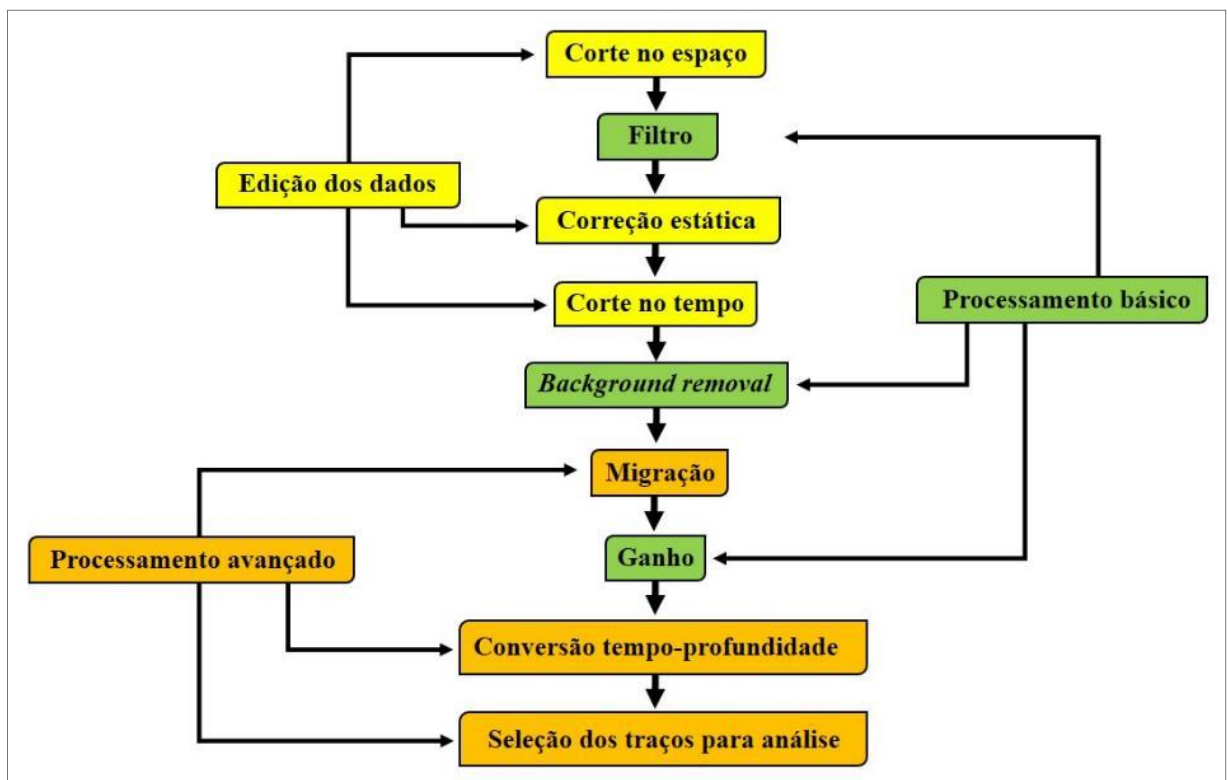


Figura 5: Fluxograma mostrando a sequência de processamento utilizada nos dados de GPR para a análise dos traços.

O primeiro passo no processamento foi a edição dos dados, que englobou questões relativas à reorganização, onde as seções foram cortadas espacialmente pelo número de traços, para que todas ficassem com o mesmo comprimento.

O passo seguinte foi uma etapa do processamento básico, que consistiu em aplicar um filtro de altas frequências (*dewow*), atuando na retirada da saturação do sinal causada por bandas de baixa frequência, mantendo fidelidade aos valores de banda da frequência central da antena utilizada. Como parâmetro de entrada para o processamento no *software* é utilizada uma janela de tempo.

Após, foi realizada a correção estática, também conhecida como correção de tempo-zero, que também é uma etapa de edição dos dados. Esta etapa de processamento é feita para correção do tempo da primeira quebra em uma seção de reflexão do GPR. A correção é feita através do movimento do conjunto total de traços para cima ou para baixo pela quantidade necessária de TWT. Para isso, deve-se ter cuidado para garantir que a correção tempo-zero produza resultados consistentes em todos os traços. Em seguida, para que todas as seções estivessem com a mesma janela de tempo, foi realizado um corte no tempo (*time-cut*).

Sob algumas condições, o sinal do GPR passa a apresentar “ruído de fundo” (*background*), manifestando-se como refletores plano-paralelos contínuos que se repetem ao longo de toda a janela da seção e podem ocultar reflexões reais. Para a remoção desse ruído sistemático aplica-se um filtro espacial denominado *background removal*. Os parâmetros de entrada no *software* são: o número de traços utilizados para o cálculo da média (número total de traços) e janela de tempo para aplicação da normalização.

Na etapa de processamento avançado, realizou-se a migração, conversão do tempo em profundidade e a seleção dos traços para a análise de amplitude.

A migração visa recuperar as relações geométricas dos eventos de reflexão dos refletores trazendo-os para suas reais posições no eixo temporal e no espacial. O método de migração utilizado foi o de Kirchhoff, uma soma ponderada para cada ponto da seção sobre uma hipérbole calculada a partir da largura de banda predefinida (total de traços da seção).

Após a migração, aplicou-se uma função ganho aos dados, para melhorar a qualidade da amplitude do sinal. A amplitude do sinal é uma importante característica, tendo em vista que esta descreve a distribuição de energia das ondas em função de sua propagação, tempo decorrido e frequência. Os processos responsáveis por alterar sinteticamente a amplitude do sinal são chamados de ganho

(ZHOU, 2013). A subsuperfície é um atenuador natural de sinal e o valor da amplitude do sinal irá decair exponencialmente com o aumento da profundidade. De acordo com essa tendência, é mais fácil visualizar o sinal em baixa profundidade do que em alta profundidade. Uma função ganho pode ser aplicada, para compensar essa perda de sinal, alterando a amplitude do sinal para uma melhor visualização do operador. Em geral, realçando as baixas amplitudes que não permitirão ao usuário visualizar os refletores mais profundos. Optou-se por aplicar o ganho após a etapa de migração, pois se observou que ao aplicar o ganho antes da migração, esta atenuava o sinal novamente. O ganho aplicado aos dados foi do tipo AGC (*Automatic Gain Control*), com a finalidade de equalizar a amplitude dos traços, que tende a ser atenuada em profundidade.

Após realizou-se a conversão da profundidade em tempo para a profundidade em distância. A conversão foi realizada através da utilização da constante dielétrica, a qual se relaciona com a velocidade através da seguinte equação:

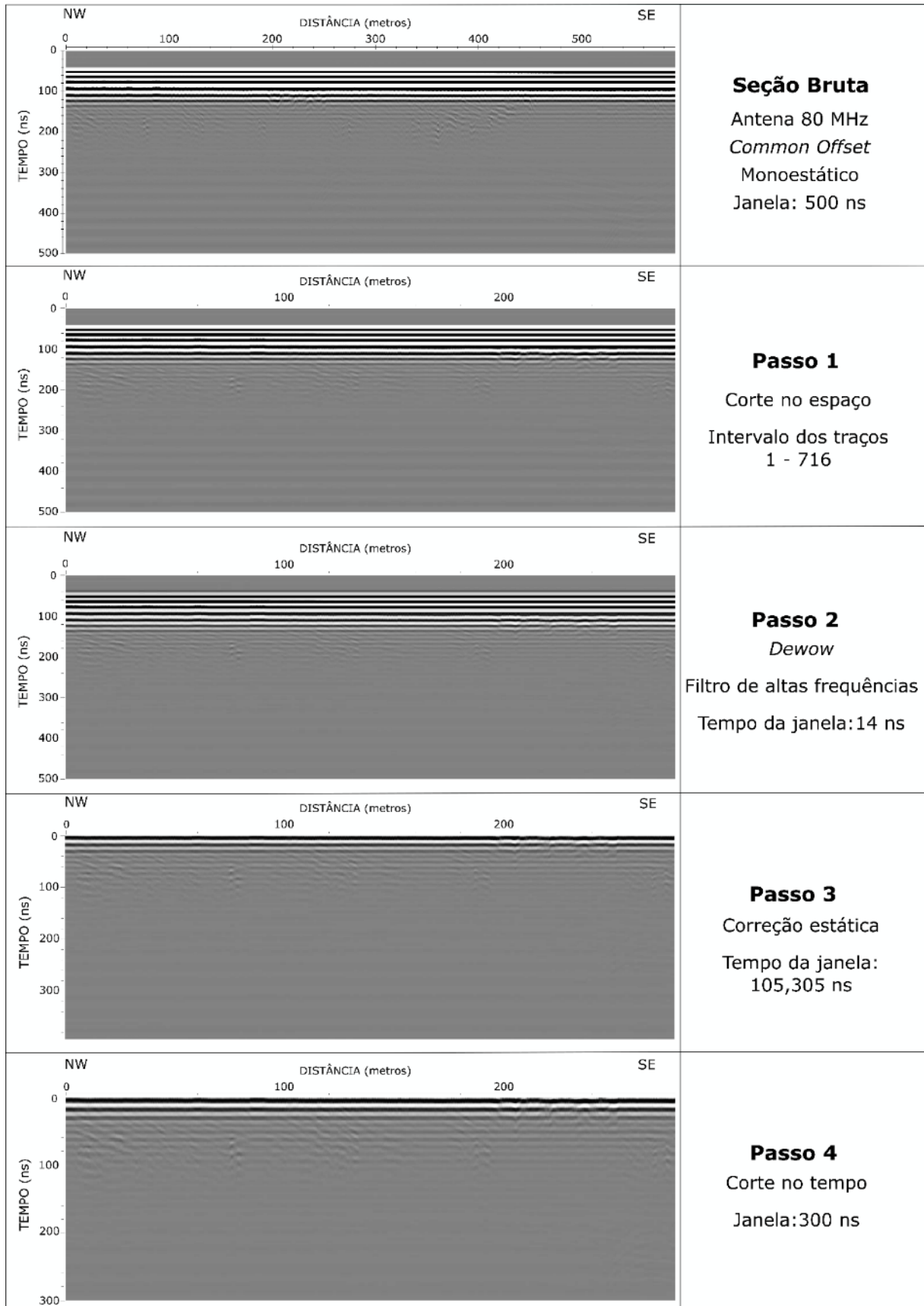
$$v = c\sqrt{k} \quad (6)$$

onde c = velocidade da luz no vácuo ($\sim 0,3$ m/ns) e k = constante dielétrica.

Utilizou-se como constante dielétrica o valor 10, que representa uma velocidade de 0,09 m/ns, geralmente relacionada com depósitos arenosos (DAVIS & ANNAN, 1989).

A constante dielétrica é extremamente variável de acordo com as características dos materiais, e o valor utilizado representa um valor limite entre areias secas, que variam de 3 a 6, e areias úmidas, que variam de 10 a 30 (DAVIS & ANNAN, 1989; DANIELS *et al.*, 1995). Além disso, em outros estudos desenvolvidos nas Planícies Costeiras do Sul do Brasil, valores dessa ordem têm sido definidos a partir de correlações com sondagens (TOMAZELLI *et al.*, 2008a; DILLENBURG *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2013; CARON, 2014).

Todos os passos e os parâmetros utilizados no processamento, para a seleção dos traços de cada antena utilizada, estão representados nas figuras 6, 7, 8, 9 e 10. Os parâmetros utilizados no processamento variaram de acordo com a frequência das antenas.



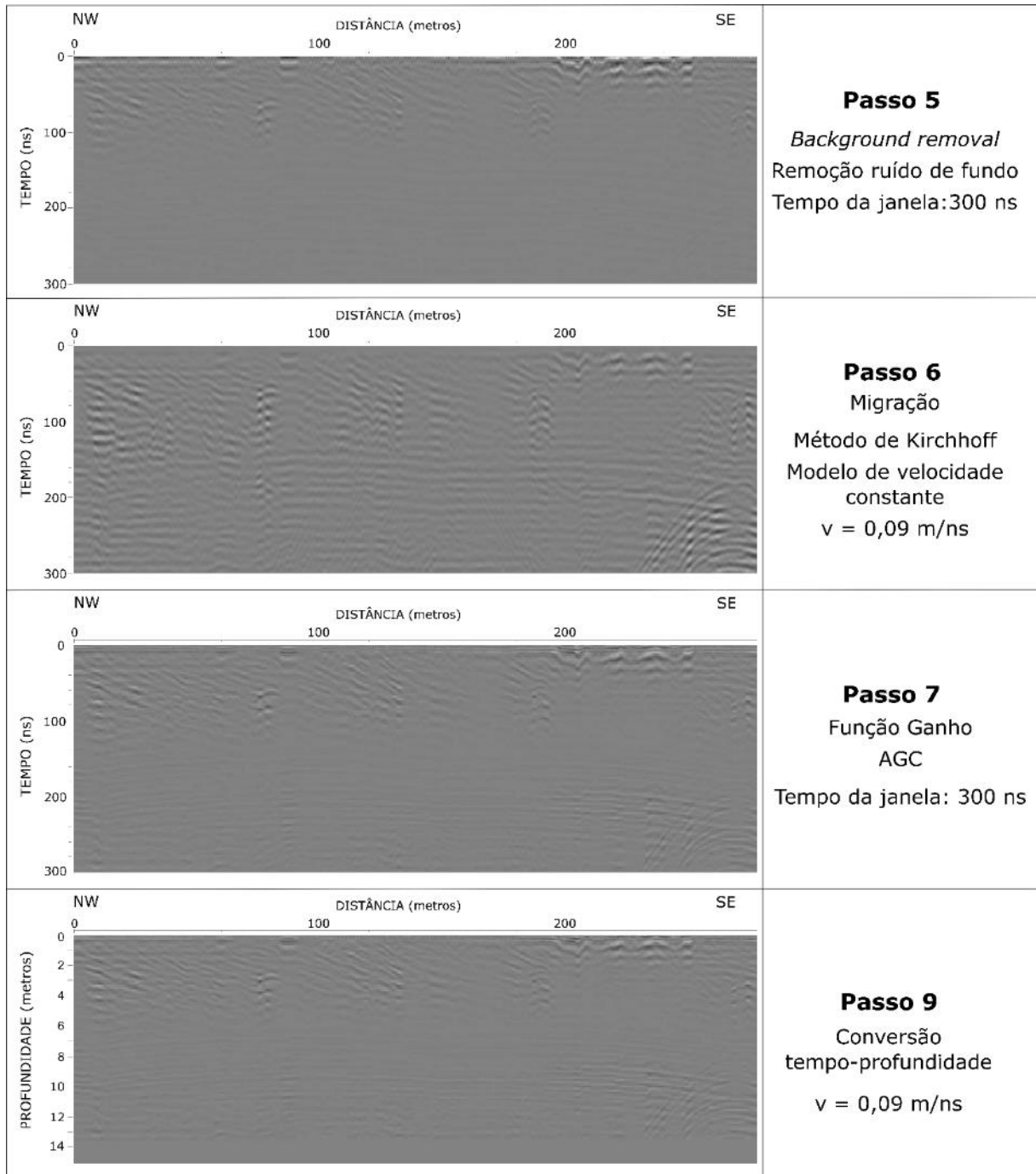
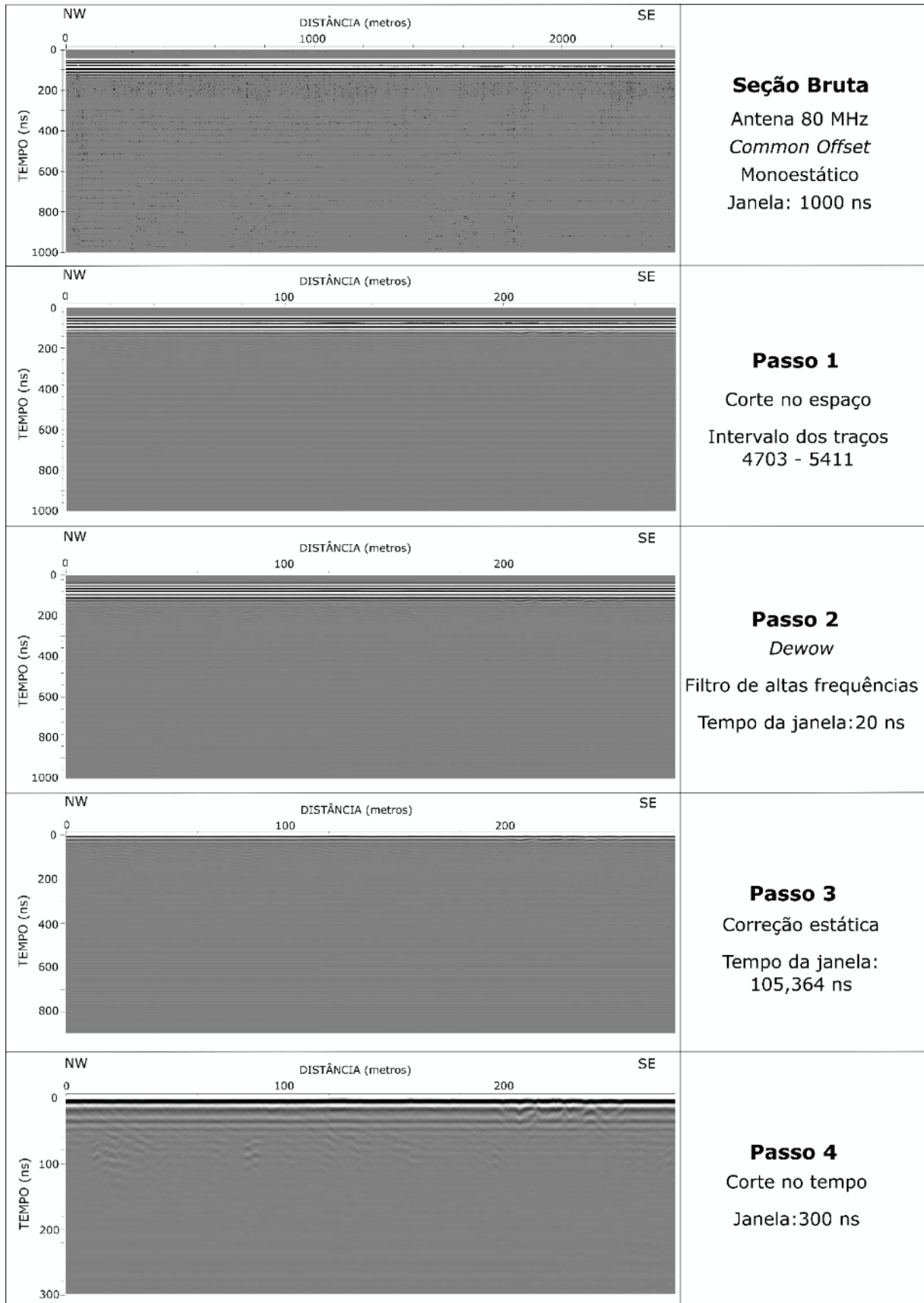


Figura 6: Sequência e parâmetros de processamento para os dados com a antena de frequência central de 80 MHz.



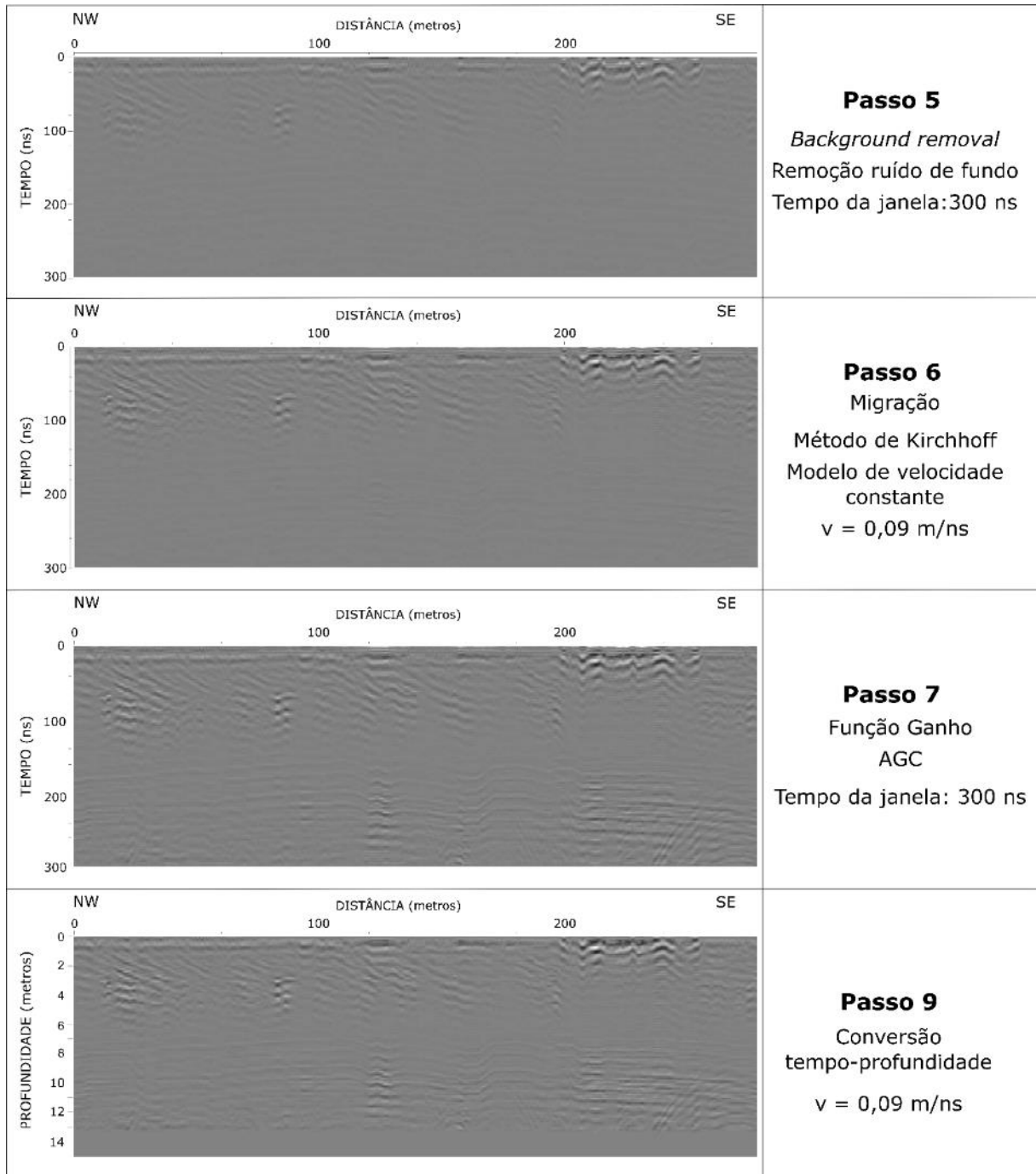
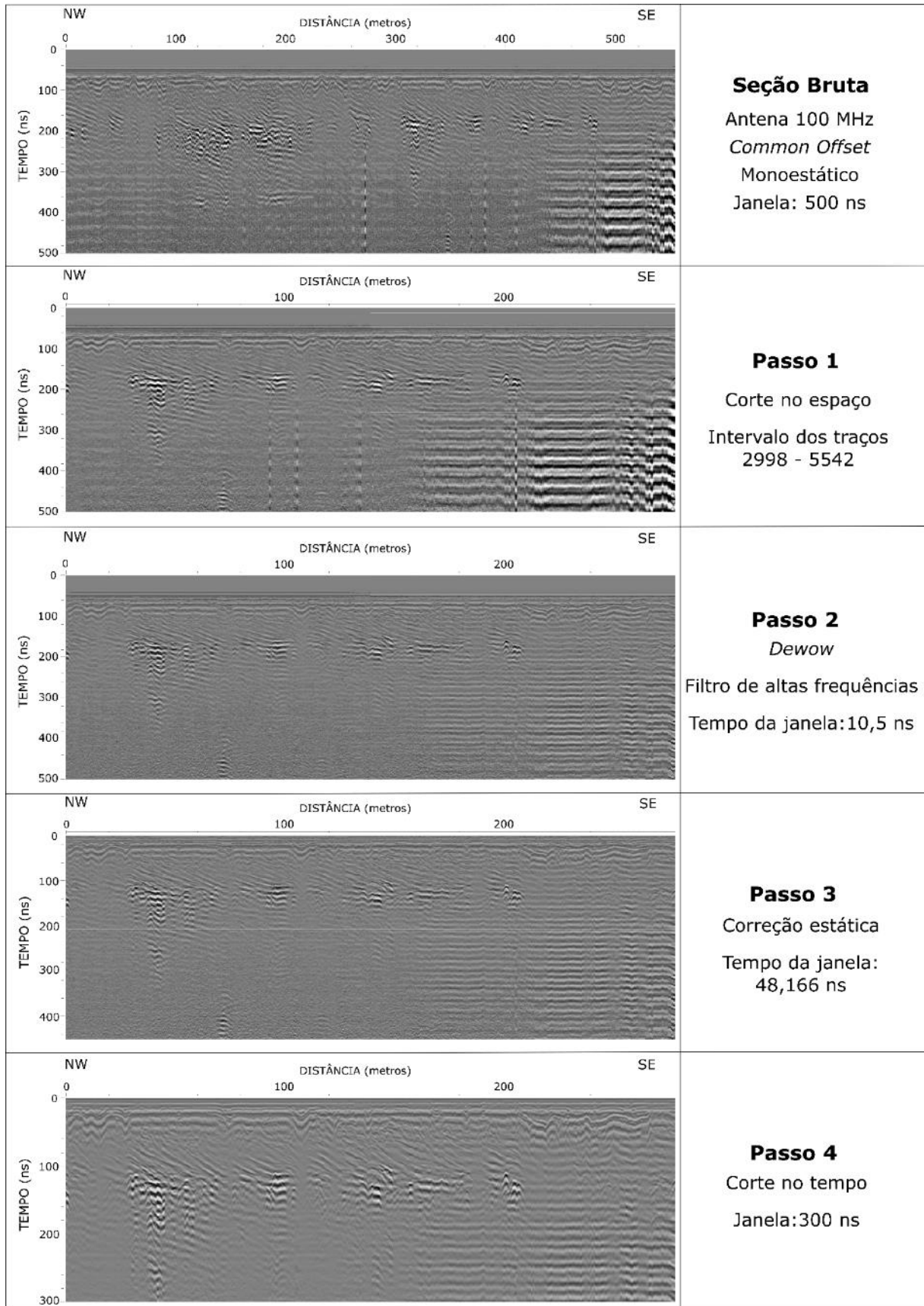


Figura 7: Sequência e parâmetros de processamento para os dados com a antena de frequência central de 80 MHz.



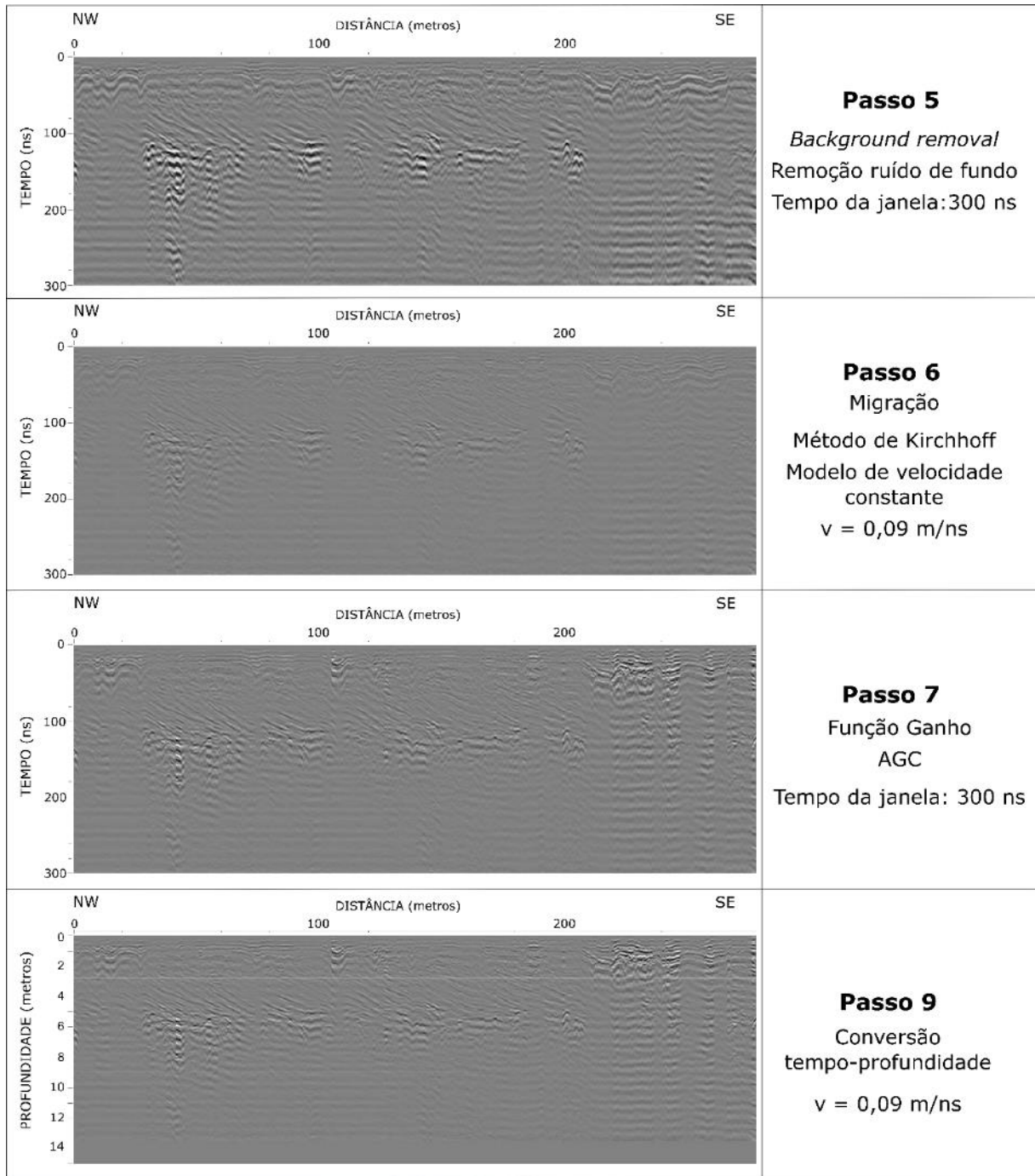
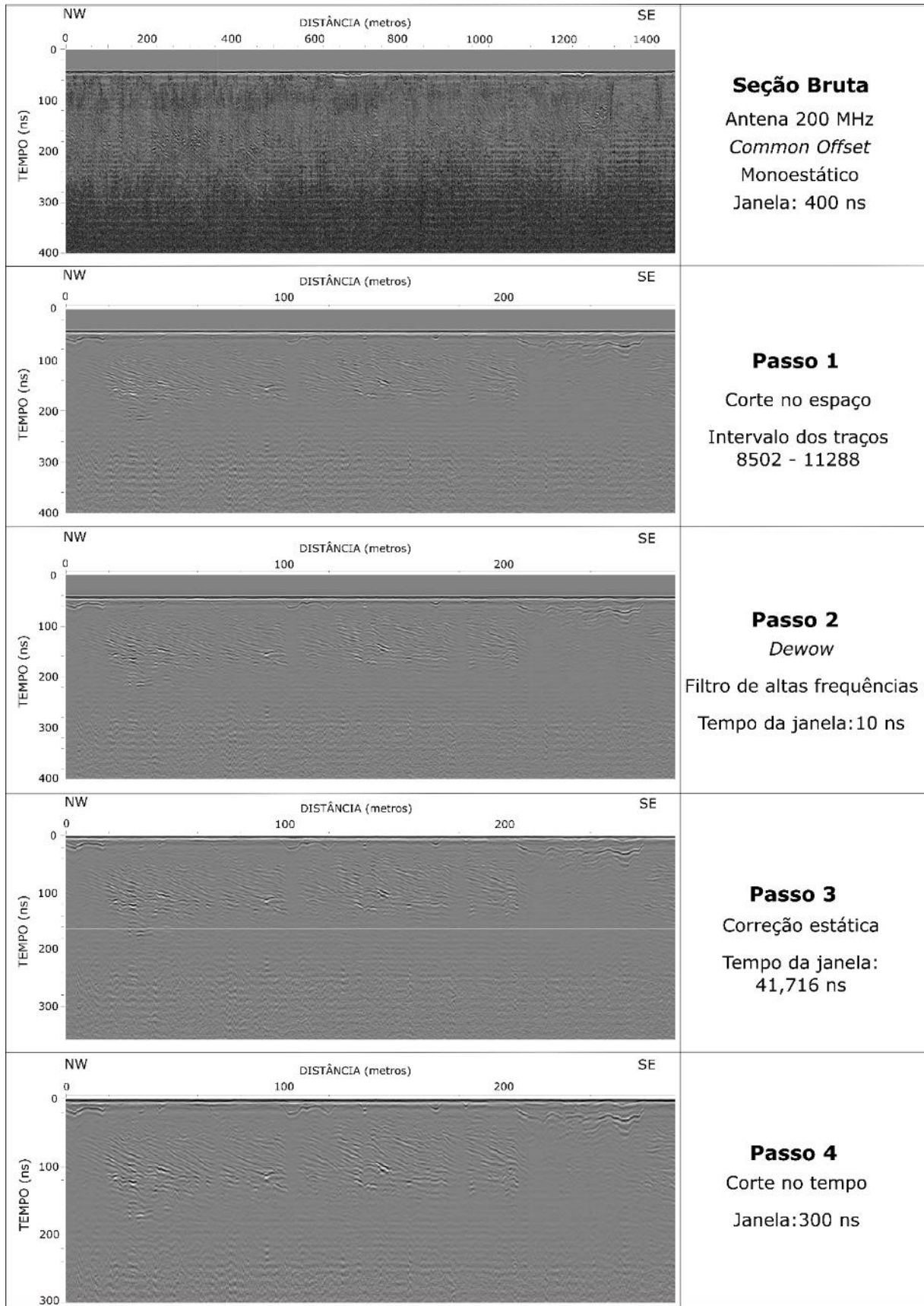


Figura 8: Sequência e parâmetros de processamento para os dados com a antena de frequência central de 100 MHz.



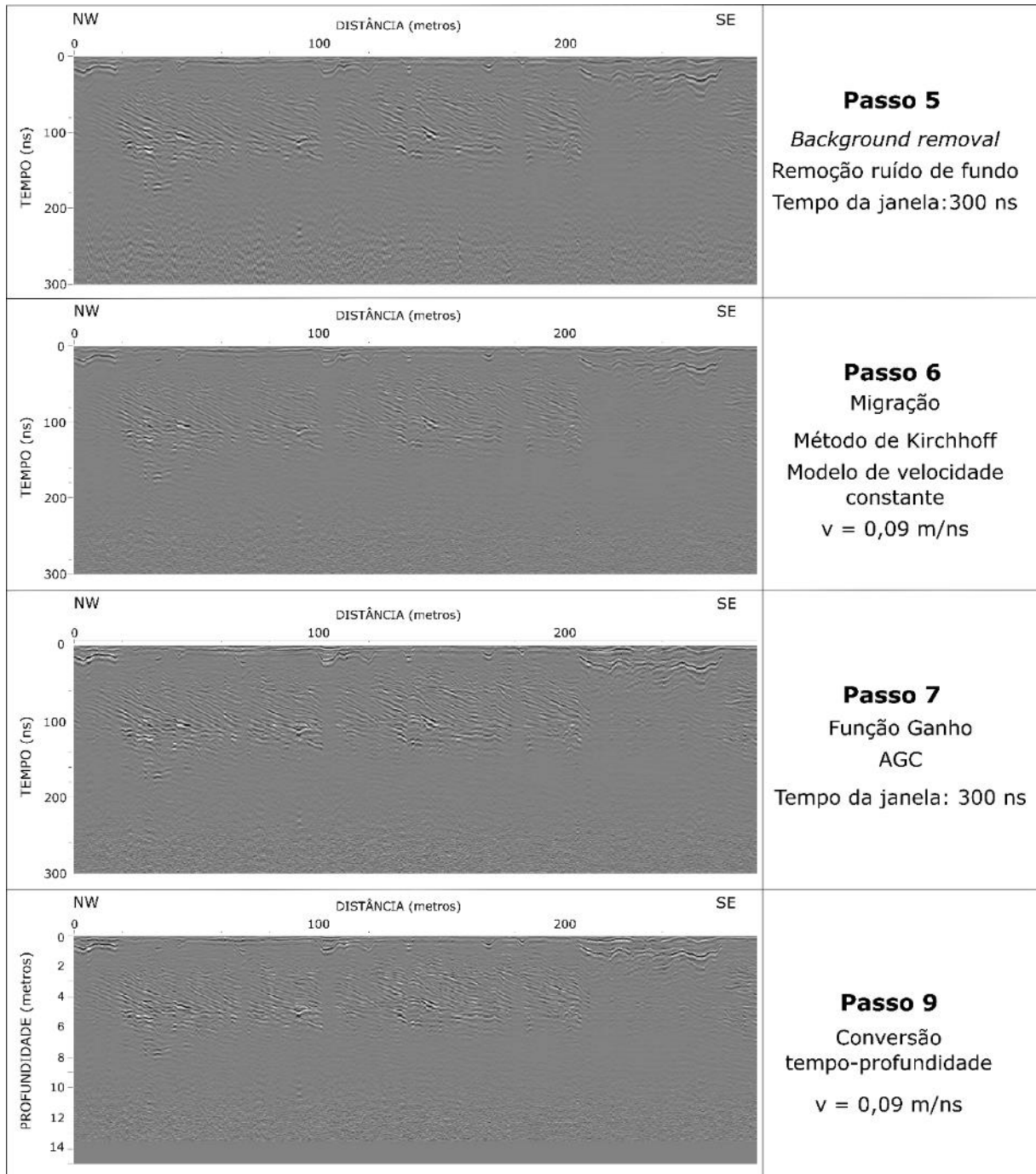
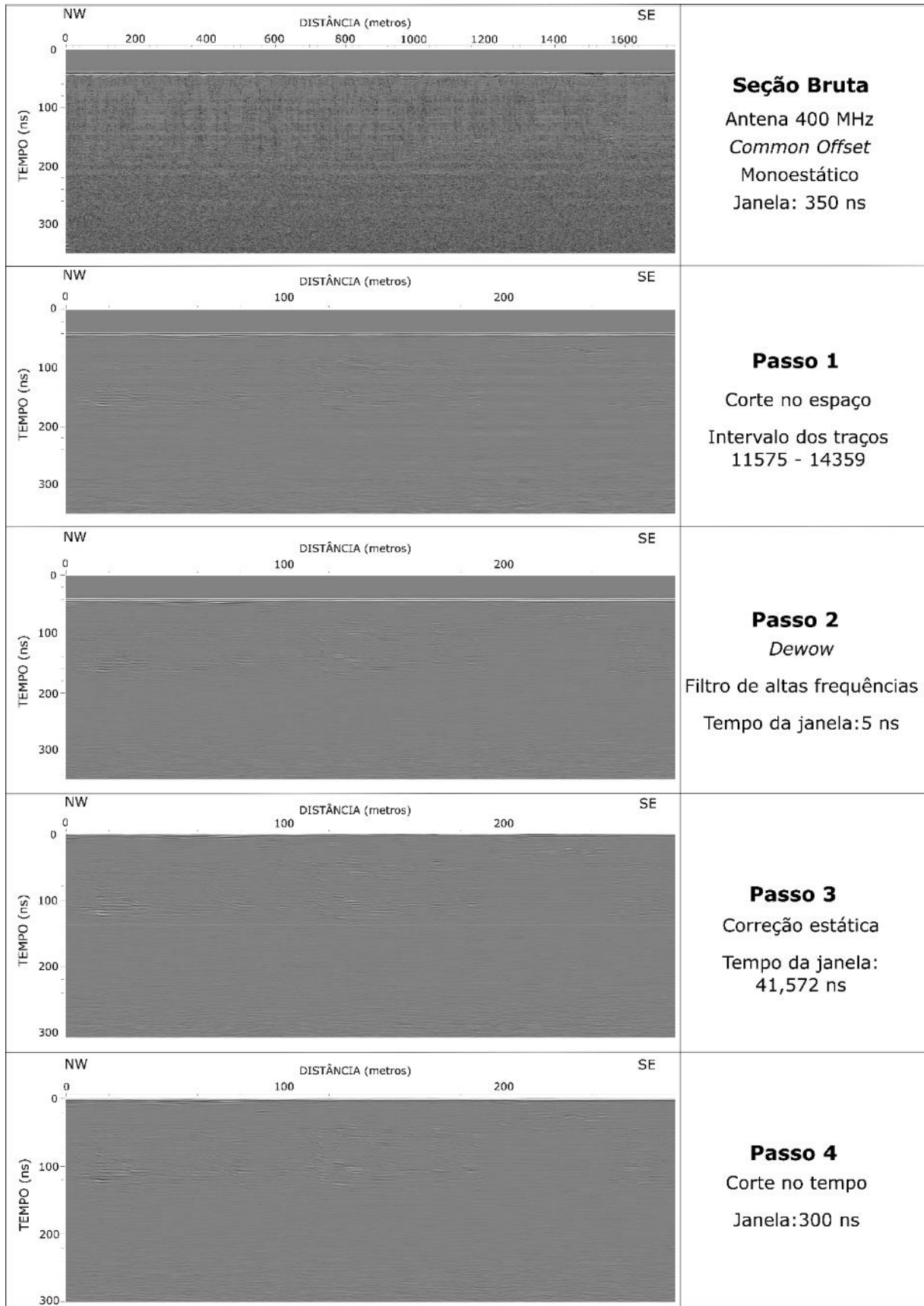


Figura 9: Sequência e parâmetros de processamento para os dados com a antena de frequência central de 200 MHz.



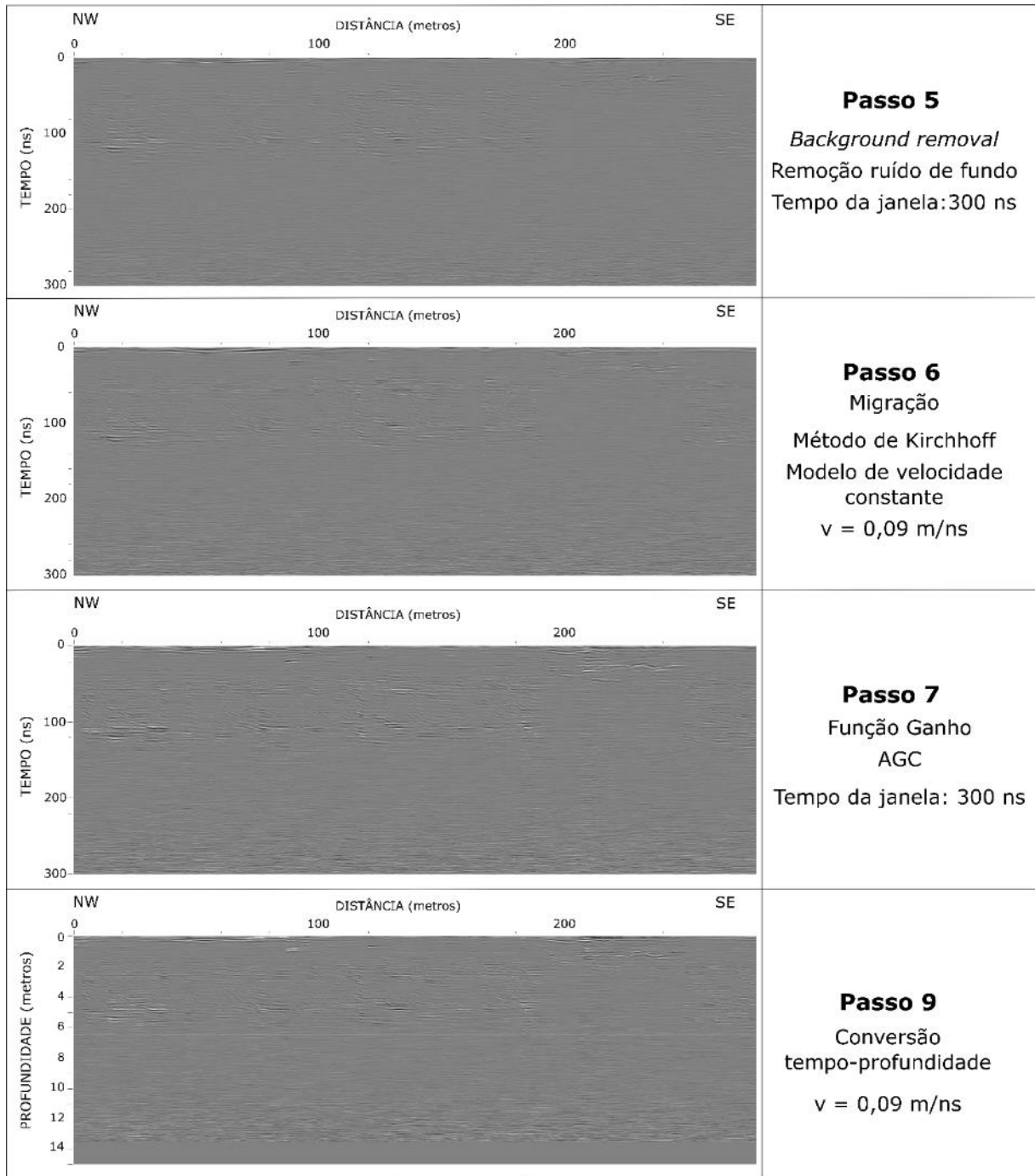


Figura 10: Sequência e parâmetros de processamento para os dados com a antena de frequência central de 400 MHz.

1.6.1 Seleção do traço para análise e determinação da constante de atenuação

Os traços selecionados para caracterização dos ambientes, foram os traços que correspondiam espacialmente com a localização do furo de sondagem FS 31. Para a determinação desses traços, verificou-se a distância que o furo de sondagem estava em relação ao início de cada perfil, e dividiu o valor dessa distância pelo

incremento espacial de cada linha. Assim, pode-se determinar o número do traço que corresponderia a localização do furo de sondagem no perfil.

O valor da constante de atenuação da amplitude do sinal em profundidade, foi estimado a partir do método dos mínimos quadrados para uma função não linear, em duas condições distintas de umidade na área de estudo. Os perfis a e b foram escolhidos para essa análise, por terem sido realizados com a mesma antena (80 MHz) e por possuírem contraste no volume de chuva. O perfil a foi realizado em 2 de dezembro de 2016, onde após três dias acumulou um total de 2,6 mm de chuva e a temperatura variou entre 26,5 e 16,2°C. No perfil b, levantado em 22 de fevereiro de 2016, a chuva acumulada em três dias foi de 114,4 mm e a temperatura variou entre 33,4 e 21,3°C. Os dados meteorológicos utilizados são da Estação 83897 (INMET) e foram extraídos do banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP).

Primeiramente, a amplitude do sinal foi colocada em módulo para análise do comportamento do decaimento da amplitude em profundidade. Após, determinou-se o valor da constante de atenuação a partir da Equação (5). Os valores encontrados para os traços 68 e 67 (perfil a e b) foram: $\alpha = 0,36$ e $\alpha = 0,3$.

Substituindo os valores das constantes de atenuação encontradas na Equação (4), pode-se gerar a curva de atenuação do sinal em profundidade estimada pelo método dos mínimos quadrados. Os valores da constante de atenuação encontrados estão de acordo com o intervalo de valores estabelecido para areias saturadas (0,03 – 0,3) (ANNAN, 1992).

1.6.2 Interpretação das radarfácies

Para interpretação dos ambientes a partir das radarfácies, foi realizado um novo processamento, visando a qualidade do radargrama para uma boa interpretação.

Aplicou-se um filtro passa-banda (*Ormsby bandpass*) no software Prism® 2.5 nos dados após o *background removal*. Este filtro atua em cada traço de forma independente. Projetado para a supressão de interferências oriundas de componentes de baixa frequência e de alta frequência do sinal. Os valores de frequência podem ser definidos manualmente ou dentro do espectro de frequência do traço. O algoritmo utilizado compreende três etapas: aplicação de FFT direta (transformada rápida de

Fourier) para transição do domínio do tempo para o domínio da frequência, supressão de componentes de baixa frequência e alta frequência de um espectro de rastreamento e aplicação de FFT reversa para transição do domínio de frequência no domínio do tempo. Os parâmetros utilizados para filtragem passa banda, para cada uma das antenas, estão demonstrados na Figura 11.

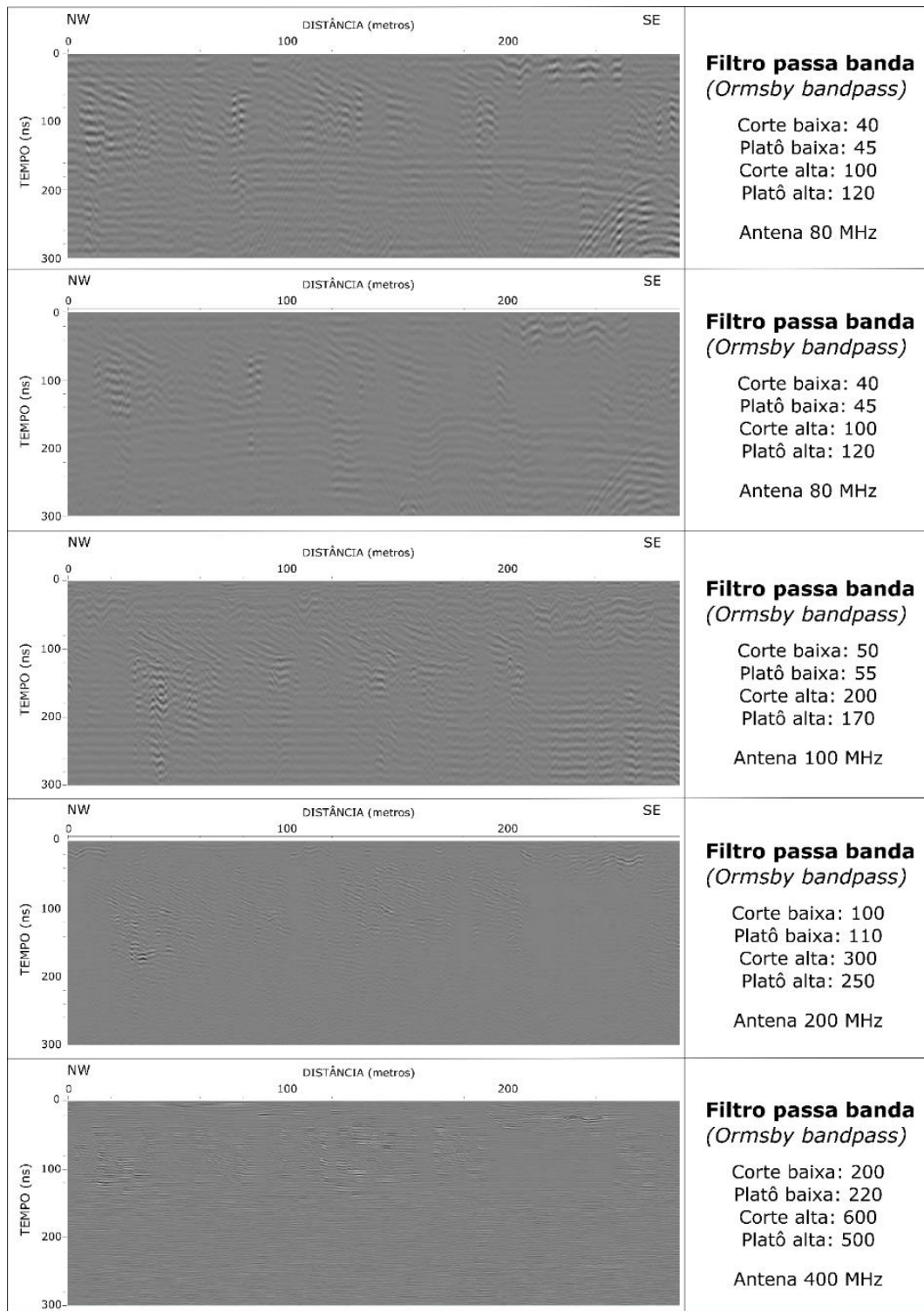


Figura 11: Parâmetros utilizados para filtragem passa banda para cada uma das antenas.

Após a aplicação da filtragem passa-banda, realizou-se a conversão da profundidade em tempo para a profundidade em distância, conforme descrito anteriormente, e aplicou-se novamente o ganho do tipo AGC.

Visando a qualidade da imagem para interpretação dos diferentes ambientes deposicionais e definições das radarfácies, um processamento de imagem foi realizado no *software Adobe Illustrator*, onde a imagem raster exportada do Prism® foi transformada em formato vetorial (Figura 12).

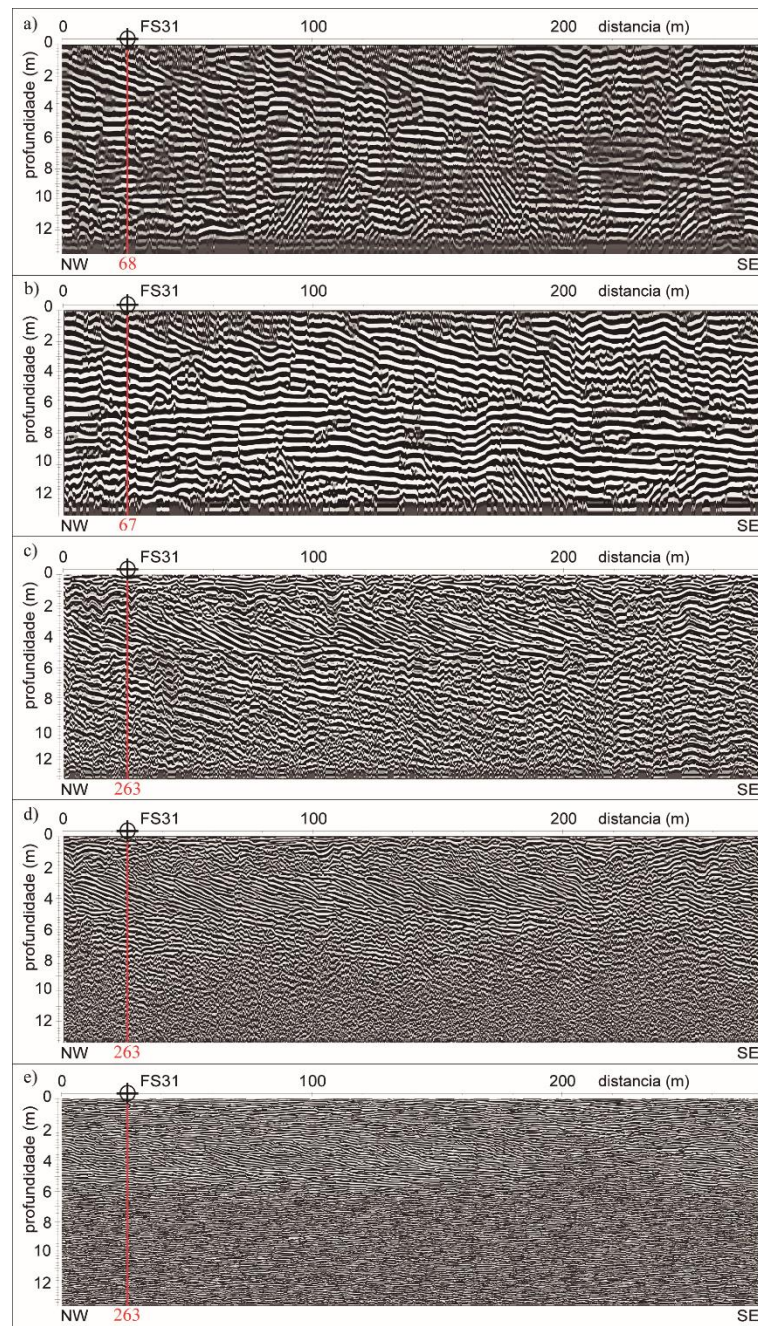





















Figura 12: Perfis de GPR para antenas de frequência central de 80, 100, 200 e 400 MHz, com a localização do furo de sondagem (FS 31) e os traços escolhidos para análise.

A definição de padrões dos refletores a partir dos perfis mostrados na Figura 10 seguiu os resultados descritos por Barboza *et al.* (2009) e Dillenburg *et al.* (2011) para a barreira regressiva da Pinheira. As características das radarfácies e interpretação dos ambientes estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2: Padrões dos refletores e interpretação dos ambientes.

Radarfácies					Descrição	Ambiente
80 MHz	80 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz		
					Refletores de alto ângulo, ondulados e não contínuos para os cordões e refletores transparentes e de baixo contraste para as cavas	Cordões litorâneos e cavas A
					Refletores são contínuos, sub-paralelos e de baixo ângulo	<i>Backshore/foreshore</i> B
					Refletores ondulados, não contínuos e mostram um padrão côncavo/convexo	<i>Shoreface superior</i> C
					Refletores contínuos, sub-paralelos e de baixo ângulo	<i>Shoreface inferior</i> D

1.7 Referências

- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711-728.
- ANGULO, R.J., GIANNINI, P.C.F., SUGUIO, K., PESSEDA, L.C.R., 1999. Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid ¹⁴C ages. *Marine Geology* 159, 323- 339.
- ANGULO, R.J., LESSA, G.C., SOUZA, M.C., 2006. A Critical Review of Mid- to Late Holocene Sea-Level Fluctuations on the Eastern Brazilian Coastline. *Quaternary Science Reviews* 25, 486-506.
- ANNAN, A.P., 1992. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software, Incorporated, Mississauga, Ontario, 150 pp.
- BAKER, G.S. & JOL, H.M., 2007. Stratigraphic analyses using GPR. Special Paper 432. The Geological Society of America. 181 pp.
- BARBOZA, E.G., DILLENBURG, S.R., ROSA, M.L.C.C., TOMAZELLI, L.J., HESP, P.A., 2009. Ground-penetrating radar profiles of two regressive barriers in southern Brazil. *J. of Coastal Research* SI 56, 579-583.
- BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J., AYUP-ZOUAIN, R.N., 2011a. Comportamento regressivo/transgressivo da linha de costa na bacia de Pelotas durante o Holoceno médio e tardio. In: López, R.A., Marcomini, S.C., (Ed.). *Problemática de Los Ambientes Costeros*. Buenos Aires, Croquis, pp. 15-30. DOI: 10.13140/2.1.4628.9602.
- BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., HESP, P.A., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J., AYUP-ZOUAIN, R.N., 2011b. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *J. of Coastal Research* SI 64, 646-650.
- BARBOZA, E.G. ROSA, M.L.C.C. DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J., 2013. Preservation Potential of Foredunes in the Stratigraphic Record. *Journal of Coastal Research* SI 65, 1265-1270.
- BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., DILLENBURG, S.R., BIANCINI DA SILVA, A., TOMAZELLI, L.J., 2014a. Stratigraphic analysis applied on the recognition of the interface between marine and fluvial depositional systems. *Journal of Coastal Research* SI 70, 205-210.
- BARBOZA, E.G., ROSA M.L.C.C., CARON, F., 2014b. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. Resumos Expandidos 1, 1-6. DOI:10.13140/2.1.3369.5047.

- BIANCINI DA SILVA, A., BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., FRACALOSSO, F.G., 2010. Caracterização dos Depósitos Sedimentares em Subsuperfície no Setor Meridional da Planície Costeira Sul de Santa Catarina. *Gravel*, 8 (1), 1-7.
- BIANCINI DA SILVA, A. 2011. Análise estratigráfica da barreira transgressiva holocênica na região da Lagoa do Sombrio, SC. Porto Alegre, 68p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <<<http://hdl.handle.net/10183/30372>>>
- BIANCINI DA SILVA, A., BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., DILLENBURG, S.R., 2014. Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research* SI 70, 687-692.
- BURGER, H.R., SHEEHAN, A.F., JONES, C.H., 2006. Ed. W. W. Norton & Company. *Introduction to Applied Geophysics*. ISBN 0-393-92637-0. 554 p.
- CARON, F. 2014. Estratigrafia e evolução da barreira holocênica na Região Costeira de Santa Vitória do Palmar, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. Porto Alegre. 167 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <<<http://hdl.handle.net/10183/88625>>>
- CISNEROS, J.I. 2001. *Onda eletromagnéticas: fundamentos e aplicações*. Campinas, SP, Editora da UNICAMP, pp: 19-38.
- COOPER, J.A.G., MEIRELES, R.P., GREEN, A.N., KLEIN, A.H.F., TOLDO, E.E., 2018. Late Quaternary stratigraphic evolution of the inner continental shelf in response to sea-level change, Santa Catarina, Brazil. *Marine Geology* 397, 1-14.
- COWELL, P.J. & THOM, B.G. 1994. Morphodynamics of coastal evolution. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (Org). *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press. pp: 33-86.
- CRUZ, O. 1993. Estudo geomorfológico em áreas costeiras da ilha de Santa Catarina e do continente circunvizinho (Florianópolis, São José, Palhoça, Biguaçu e Governador Celso Ramos). 182 p. Relatório Técnico Final de Pesquisa – CNPq.
- DANIELS, D.J., 2004. *Ground Penetrating Radar*, second ed IET, London, UK. 726 pp.
- DANIELS, D.J., 1996. *Surface penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300 pp.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospect.*, 37, 531-551.

- DAVIS JR., R.A. & HAYES, M.O. 1984. What is a wave-dominated coast? In: Greenwood, B. e Davis JR., R.A. Hydrodynamics and Sedimentation in Wave-Dominated Coastal Environments. *Marine Geology*, 60: 313-329.
- DIAS, J.L., SAD, A.R.E., FONTANA, R.L., FEIJÓ, F.J., 1994. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências da Petrobras* 8, 235-245.
- DILLENBURG, S.R. & BARBOZA, E.G., 2014. The Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P.; Wanless H.R. (Eds.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. Geological Society, London. Special Publications 388, 333-352.
- DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E.G., HESP, P.A., ROSA, M.L.C.C., 2011. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research* SI 64, 651-655.
- DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E.G., HESP, P.A., ROSA, M.L.C.C., ANGULO, J.R., SOUZA, M.C., GIANINNI, P.C.F., SAWAKUCHI, A.O., 2014. Discussion: "Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: implications for complex response to environmental change" by Hein, et al., 2013. *Sedimentology* 60, 469–502. A transgressive barrier at Pinheira, Southern Brazil around 3 ka? *Sedimentology* 61, 2205-2212.
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; CARON, F.; SAWAKUCHI, A.O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brasil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7-6 ka. *Marine Geology* 390, 106-119.
- FORNARI, M. 2010. *Evolução sedimentar holocênica da retrobarreira na região de Jaguaruna-Laguna, Santa Catarina*. São Paulo. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 290 pp.
- HEIN, C.J., FITZGERALD, D.M., CLEARY, W.J., ALBERNAZ, M.B., MENEZES, J.T., KLEIN, A.H.F., 2013. Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: Implications for complex coastal response to environmental change. *Sedimentology* 60, 469-502.
- HESP, P.A., GIANNINI, P.C.F., MARTINHO, C.T., SILVA, G.M., ASP, N.E., 2009. The Holocene Barrier Systems of the Santa Catarina Coast, Southern Brazil. In: *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.), *Lect. Notes Earth Sci.*, 107, 93-133.
- HORN FILHO, N.O. 2003. Setorização da província costeira de Santa Catarina em base aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geográficos. *Geosul* 35(18): 284-288.
- INMET. 2017. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). <http://www.inmet.gov.br/porta/index.php?r=bdmep/bdmep>. (acessado 07 de Junho de 2017).

- JOL, H.M., BRISTOW, C.S., 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: Bristow, C.S., JOL, H.M., (Eds.). Ground Penetrating Radar in Sediments. Geological Society. London Special Publications 211, 09-27.
- JOL, H. M. 2009. Ground Penetration Radar: Theory and Applications. Amsterdam: Elsevier Science.
- KLEIN, A.H.F., MOCELLIM, O., MENEZES, J.T., BERRIBILLI, M., VINTÉM, G., DAFFERNER, G., DIEHL, F.L., SPERB, R.M., SANTANA, G.G., 2005. Beach Safety Management on the Coast of Santa Catarina, Brazil. *Zeitschrift für Geomorphologie* 141, 47-58.
- KLEIN, A. H. F., SHORT, A., BONETTI, J., 2016. Santa Catarina Beach Systems: 41 p.
- LIMA, L.G.; DILLENBURG, S.R.; MEDEANIC, S.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; TOMAZELLI, L.J.; DENHARDT, B.A. & CARON, F. 2013. Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 42, 27-38.
- MIOT DA SILVA, G. 2006. Orientação da linha de costa e dinâmica dos sistemas praia e duna: Praia de Moçambique, Florianópolis, SC. 290 p. Tese de doutorado, Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. <<<http://hdl.handle.net/10183/9993>>>
- MONTEIRO C.A.F. Atlas geográfico de Santa Catarina. 1958. IBGE – Departamento Estadual de Geografia e Cartografia (Série 2, publ 2), Florianópolis.
- MOREY, R. M. 1974. Continuous subsurface profiling by impulse radar. In: Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction, Henniker. *Proceedings...*, Henniker: American Society of Civil Engineers, pp: 213-232.
- NEAL, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, pp: 261-330.
- OLHOEFT, G. R. 1996. Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine Ground Penetrating Radar Performance. In: 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, Tohoku University, Sendai, Japan, CD-ROM.
- OTVOS G. E. 2000. Beach ridges: definitions and significance. *Geomorphology*, v.32, pp: 83-108.
- PACHECO, F.C. 2015. Classificação Morfodinâmica de Praias Oceânicas por meio da Análise Visual de Imagens de Satélite Multitemporais da Costa Sudeste do Estado de Santa Catarina. Florianópolis. 107 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. <<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157326>>>

- ROSA, M.L.C.C. 2012. Geomorfologia, padrões de empilhamento e potencial de preservação do registro estratigráfico dos sistemas deposicionais costeiros no Quaternário do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 246 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <<<http://hdl.handle.net/10183/66367>>>
- ROSA, M.L.C.C., HOYAL, D.C., BARBOZA, E.G., FEDELE, J., ABREU, V.S., 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. In: Budd, D.A., Hajek, E.A., Purkis, S.J. (Eds.), *Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems*. SEPM Special Publication 106, 176-197.
- ROSA, M.L.C.C., BARBOZA, E.G., ABREU, V.S., TOMAZELLI, L.J., DILLENBURG, S.R., 2017. High-frequency sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology* 47(2), 183-207.
- SCHETTINI, C.A.F., CARVALHO, J.L.B., JABOR, P. 1996. Comparative hydrology and suspended matter distribution of four estuaries in Santa Catarina State-Southern Brazil. In: *Proceedings... Workshop on Comparative Studies of Temperate Coast Estuaries*. Bahia Blanca, pp: 29-32.
- SHORT, A.D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 379 p.
- SILVA, A.P., 2016. CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO DIRECIONAL MÉDIO DE ENERGIA DE ONDA DURANTE O HOLOCENO ATRAVÉS DA ANÁLISE MORFODINÂMICA DE CORDÕES ARENOSOS: ESTUDO DE CASO NA ENSEADA DA PINHEIRA (SC). Florianópolis. 120 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina.
- TANAKA, A.P.B. 2010. Sedimentologia, Cronologia e Dinâmica Progradacional das Planícies Costeiras de Campos Verdes e Ji (Laguna, SC). 113 p. Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- TOMAZELLI, L.J.; BARBOZA, E.G.; DILLENBURG, S.R.; ROSA, M.L.C.C.; CARON, F. & LIMA, L.G. 2008a. Implantação, preenchimento e desenvolvimento de vales incisos na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. 102 p. Projeto PETROBRAS. Relatório Interno.
- TRUCOLLO. E.C. 1998. Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul – SC. 100 p. Dissertação de mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- VILLWOCK, J.A., TOMAZELLI, L.J., LOSS, E.L., DEHNHARDT, E.A., HORN FILHO, N.O., BACHI, F.A., DENHARDT, B.A., 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 4, 79-97.
- ZHOU, H.-w. *Practical Seismic Data Analysis*. Houston: University of Houston. 2013.

2 CORPO PRINCIPAL – ARTIGO SUBMETIDO

GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil

Carolina G. Leandro ^{a*}, Eduardo Guimarães Barboza ^{a,b}, Felipe Caron ^c, Felipe Augusto Nascimento de Jesus ^c

^a Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Av. Bento Gonçalves, 9500; 91501-970 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

^b Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Av. Bento Gonçalves, 9500; 91501-970 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

^c Universidade Federal do Pampa, Av. Pedro Anunciação 111; 96570-000 Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil

* Corresponding author. Tel.: +55 55 99932-7990

E-mail addresses: carolina.leandro@ufrgs.com (C. G. Leandro).

ABSTRACT

Ground penetrating radar (GPR) that is seeing increasing use for subsurface detection due to the nondestructive characteristics. Use of the method for studies of coastal depositional environments is growing in southern Brazil. In this paper, we propose an analysis of traces in the variation in signal amplitude, integrated with the degree of compaction determined in the drill hole, for the characterization of depositional environments in regressive barriers. Signal attenuation with depth was interpreted from the least squares method for two cases of contrast in volume of rainfall. Results show efficiency of the methodology in determination of contacts between different deposits at depth, showing an increase in signal amplitude at the contact between the original environments from low to high compaction. Decrease in amplitude is observed in traces at the contact between environments from high to low compaction. Precipitation is not relevant for signal attenuation in the sandy deposits studied.

Keywords: GPR survey, signal analysis, signal attenuation, regressive barrier.

1. Introduction

Ground-Penetrating Radar (GPR) is a geophysical method that offers fast and good data acquisition, making it a significant tool for imaging of sedimentary structures (Gawthorpe et al., 1993; Oliveira Jr. et al., 2008). This method is based on electromagnetic wave propagation and commonly used for nondestructive subsurface imaging (Conyers, 2004; Daniels, 2004). Notwithstanding the success of the method in imaging sandy bodies, the factors that control GPR reflections on these bodies require additional studies (Oliveira Jr. et al., 2003b).

Intense research of depositional systems and sedimentology were undertaken (Jol and Bristow, 2003; Neal, 2004; Baker and Jol, 2007; Scarelli et al., 2017). In the present study,

the GPR method was applied to coastal evolution and stratigraphic analysis of Holocene barriers in southern Brazil (Barboza et al., 2009, 2011ab, 2013, 2014a; Biancini da Silva et al., 2014; Dillenburg et al., 2011, 2014, 2017; Leal et al., 2016; Oliveira et al., 2016; Rockett et al., 2016; Rosa et al., 2016, 2017). However, most studies used only geological parameters such as lithofacies analysis, sedimentary structures, compaction degree and set of mollusks to interpret and define the depositional environments, without detailed examination of the geophysical data.

This work concentrates on results of geophysical surveys using the GPR method in the Pinheira regressive barrier, southern Brazil. The results allowed the characterization of coastal depositional environments through the analysis of the trace and defined survey parameters that best characterize such environments. This is a pioneering work on the analysis of traces for characterization of depositional environments.

2. Regional and geological setting

The Pinheira regressive barrier is part of the northern sector of the Pelotas Basin, a marginal sedimentary basin with approximately 40,000 km² emerged area (Dias, 1994). The coastal plain, in the study area, is formed by alluvial fan systems and by the lateral juxtaposition of two barrier-lagoon depositional systems, first defined for Rio Grande do Sul state by Villwock et al. (1986). These two systems of Pleistocene and Holocene ages were identified by Dillenburg et al. (2014) as Barrier III and Barrier IV, analogous to the entire coast of the state. Each barrier-lagoon system is related to as a high-frequency depositional sequence (Rosa et al., 2011, 2017). The Pinheira regressive barrier is symmetrical, arcuate embayment covering 180° of curvature (Dillenburg et al., 2011) (Fig. 1a), localized in the north of the most extensive sandy coastal embayment of the northern Pelotas Basin – Tramandaí/ Santa Marta Cape (Dillenburg and Barboza, 2014).

According to the classification of Köppen, the climate of the region is subtropical constantly humid (Cfa), without a dry season, with hot summer (Alvares et al., 2014). Average annual precipitation is between 1,600 and 1,900 mm, with maximum values in summer months and lowest in winter. The average annual temperature is between 20 and 22°C. The Pinheira beach according to Klein et al. (2005) and Silveira et al. (2011), is a dissipative beach with high energy waves, fine sediments, large swash zone, and surf zone with multiples banks.

Sea level behavior during the Holocene in the region was reported by Angulo et al. (1999, 2006). After fast sea-level rise from 18 ka, the rise slowed at around 7 ka, when it surpassed the present level. Between 6 and 5 ka, the highest level of 2 m was reached (Dillenburg et al. 2011). Research on the Pinheira regressive barrier and other regressive barriers of southern Brazil in the last ten years examined the Holocene records (Barboza et al., 2009; Hesp et al., 2009; Dillenburg et al., 2014; Hein et al., 2013; Cooper et al., 2018).

A vertical succession of facies (coarsening-upward) of the regressive sequence at Pinheira barrier (Fig 1b) was described from bottom to top by Dillenburg et al. (2011) with radarfacies analysis in conjunction with the lithological data identified in the drill hole FS 31. The facies are:

Lower shoreface facies (D) - Very low compacted, dark grey greenish, moderately to poorly sorted, quartzose fine sand, mud 20 to 30%, showing large and well-preserved shells and debris of marine species of *Nucula semiornata*, *Macra* sp., *Pitar* sp., *Olivella* sp., and *Donax* sp., and marked by continuous, sub-parallel and low angle GPR reflectors.

Upper shoreface facies (C) - Moderately compact, grey greenish, quartzose fine sand, with small but well preserved marine shell of *Macra patagonica*, *Macra* sp., *Pitar* sp. and

Littoridina australis. GPR reflectors are undulating, noncontinuous and showing a concave/convex pattern.

Backshore/foreshore facies (B) - Highly compact, grey greenish, moderately sorted, quartzose fine sand, with shell hash concentrated in laminations or disseminated, showing plane-parallel and low-angle cross-lamination. GPR reflectors are continuous, sub-parallel and low angle.

Foredune ridge or swale facies (A) - Very low compact, white, well sorted, quartzose fine sand showing a faint plane-parallel lamination, with some mud and peat in the more developed swales. GPR records show reflectors that are non-continuous and high angle undulated at ridges and low contrast to transparent GPR at swales.

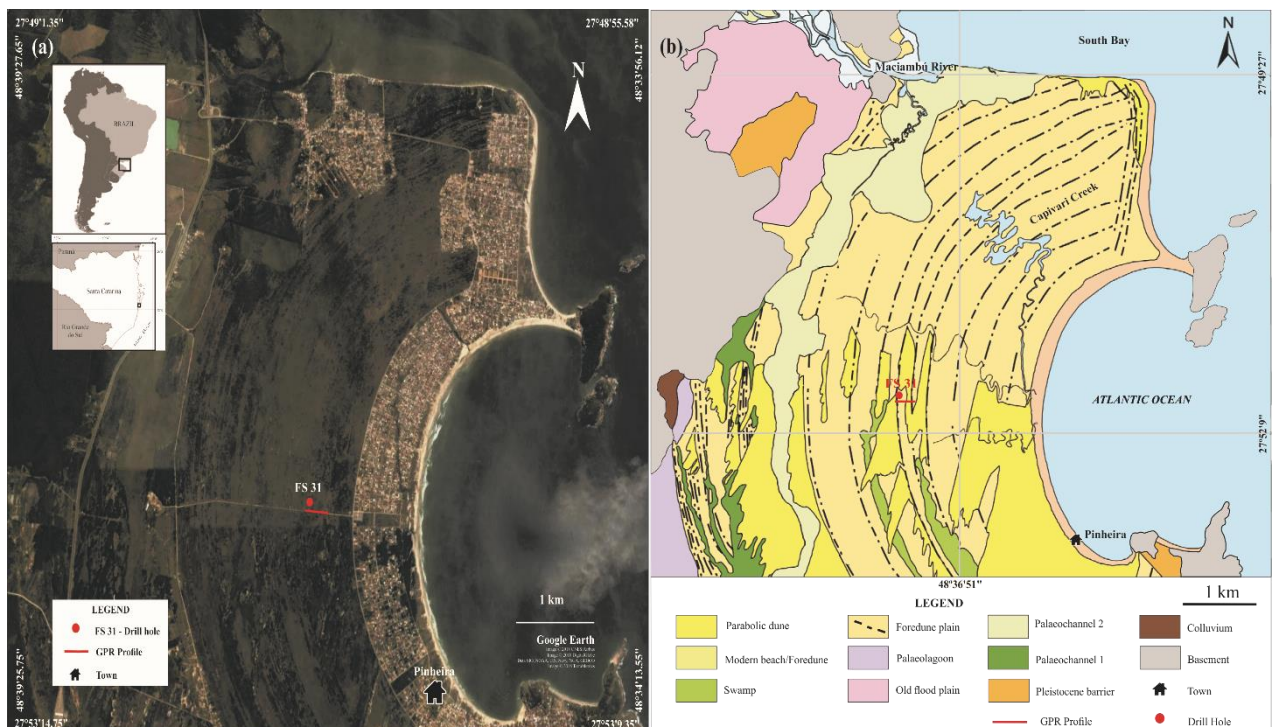


Fig. 1. a) Location of study area, GPR profile, and drilling hole FS 31; inset shows location in South America, satellite image from Google™ Earth; b) Geological and geomorphological map of the Pinhiera regressive barrier, modified from Dillenburg et al. (2014).

3. Materials and methods

This study is based on records of Ground Penetrating Radar (GPR) and one percussion drilling system (SPT – Standard Penetrating Test).

3.1. GPR

GPR records were acquired with the Common Offset method developed on an unpaved road according to Barboza et al. (2014b) (Fig. 1a). Orientation of profiles is perpendicular to the greatest extent of the foredune ridges at a high angle with a shoreline. We used GPR system GSSI™ (Geophysical Survey Systems, Inc.), SIR-3000 data collector for central frequency antennas of 100, 200 and 400 MHz, and a Cobra Plug-In GPR (Radarteam Sweden AB) data acquisition system with a SUBECHO SE-70 aerial antenna with a central frequency of 80 MHz. Survey parameters for each profile are shown in Table 1.

Table 1

Measurement parameters.

Profile	Antenna central frequency (MHz)	Number of traces	Number of points in a trace	Time window (ns)	Trace interval (m)
a	80	1520	512	500	0.3887
b	80	6247	512	1000	0.3930
c	100	5542	2048	500	0.1000
d	200	14676	1024	400	0.1000
e	400	17446	1024	350	0.1000

Data have different spatial and temporal window sizes, leading to the use of a processing routine with Reflex-Win® software. The GPR profiles were organized to allow comparison. Basic processing steps, usually directly applied to the raw data, are trace editing,

filtering or data correction, with introduction of minimal user bias. Authors kept in mind that no amount of processing can save poor quality data (Cassidy, 2009). Data processing followed the steps in Table 2.

3.1.1. Electromagnetic wave velocity

Velocity (v) of an electromagnetic wave can be written as a function of its frequency (f), velocity in vacuum (c), and the relative mean of the dielectric constant of the medium (ϵ_r), relative magnetic permeability (μ_r) and electrical conductivity (σ):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right)^2}}{2}}} \quad (3 - 1)$$

where $\sigma/\omega\epsilon$ is the attenuating factor and $\omega = 2\pi f$ (rad s⁻¹) is the angular frequency.

For materials of a low attenuating factor, e.g., clean sand and gravel, the influence of the electrical conductivity (σ) on the GPR frequency range is minimal. Thus, we can assume $\sigma/\omega\epsilon = 0$ (Neal, 2004). Little is known about the influence of the relative magnetic permeability (μ_r) on the signal and its given $\mu_r = 1$, so we can write the simplified equation (3 - 1):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3 - 2)$$

where c is the velocity of an EM wave in free space (3.0×10^8 m/s) and ϵ is the dielectric constant.

The dielectric constant used was 10, which represents a velocity of 0.09 m/ns, usually corresponding to sandy deposits (Davis and Annan, 1989).

3.1.2. Attenuation of signal

Geometric scattering and energy transformation occur as the wave propagates through a medium. This attenuation occurs exponentially, and expressed mathematically by relating the final amplitude (A), the initial amplitude (A_0) and the distance traveled (z):

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (3 - 3)$$

where α is an attenuation constant. This constant is independent of the frequency from the point of view of materials with low attenuating factor, therefore:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3 - 4)$$

Thus, electrical conductivity (σ) is directly proportional to the attenuation constant (α) of the medium.

3.1.3. Attenuation constant

The least squares method was used in two different humidity conditions in the study area for a non-linear function to determine the value of the attenuation constant of the amplitude of the signal in depth.

3.1.3.1. The least squares method

The least squares method is a mathematical regression analysis that finds the line of best fit for a dataset, providing a visual demonstration of the relationship between the data points. Each point is representative of the relationship between a known independent variable and an unknown dependent variable.

Because the amplitude of the signal is the result of an exponential function, a linearization of the problem was developed through some convenient transformation, that is, the case was adapted to a linear adjustment.

As the available data have exponential behavior, the following adjustment is suggested:

$$\varphi(x) = \alpha_1 e^{\alpha_2 x} \quad (3 - 5)$$

The linearization of the function chosen to adjust the data was done as follows:

$$\varphi(x) = \alpha_1 e^{\alpha_2 x} \rightarrow z = \ln(\varphi(x)) \rightarrow z = \ln\alpha_1 + \alpha_2 x \quad (3 - 6)$$

being $\beta_1 = \ln\alpha_1$ and $\beta_2 = \alpha_2 x$, the problem was to fit the (z) data along the straight line:

$$z(x) = \beta_1 + \beta_2 x \quad (3 - 7)$$

A new data table was constructed for the data:

$$z_k = \ln(y_k) = \beta_1 + \beta_2 x \quad (3 - 8)$$

therefore

$$F(\beta_1, \beta_2) = \sum_{k=1}^n [z(x_k) - (\beta_1 + \beta_2 x_k)]^2 \quad (3 - 9)$$

From the resolution of the Eq. (3 - 9), we determined the values for β_1 and β_2 , where $\alpha_1 = e^{\beta_1}$ and $\alpha_2 = \beta_2$.

In this way, the linearization of an exponential curve will be given by:

$$z = \beta_1 + \beta_2 x \quad (3 - 10)$$

where $z = \ln y$, $\beta_1 = \ln(\alpha_1)$ and $\beta_2 = \ln\alpha_2$.

3.2. Drill hole

FS 31 was drilled in the middle part of the barrier by a percussion drilling system (SPT – Standard Penetrating Test (Fig. 1a), that allows the determination of the degree of compaction of the drilled sand. The SPT system recovered a small cylinder of the sample (0.15 to 0.45 m length, diameter 0.38 m) every 1 m of drilling penetration. Compaction values were assumed from the number of strokes required per meter of drilling.

3.3. Meteorological data

Meteorological data were extracted from the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP). The database has daily digital weather information from historical series of the various conventional weather stations of the INMET network with millions of information about daily measurements by the international technical standards of the World Meteorological Organization. In the BDMEP, data are available for stations with at least 80% of recorded data available digitally. The meteorological data used are from Station 83897 (INMET), closest to the study area, Florianópolis, capital of the state of Santa Catarina.

The atmospheric variables used are - Precipitation in the last 24 hours; maximum temperature and minimum temperature.

4. Results

The signal processing steps and parameters applied to the GPR data are summarized in Table 2. Surveyed profiles chosen have 80 MHz central frequency antenna to determine the attenuation constant as a function of humidity (Fig. 2). Profile 'a' was surveyed December 2, 2016, following three days of rain accumulation totaling 2.6 mm and the temperature varied between 26.5 and 16.2°C. In profile 'b', surveyed February 22, 2016, rain accumulated in three days was 114.4 mm, and temperature varied between 33.4 and 21.3°C. These two profiles were chosen because they were acquired with the same antenna have contrast in the volume of rainfall.

Traces coinciding spatially with the drill hole (Fig. 3) were selected for the analysis of the amplitude and correlation with the depositional environments and compaction.

Table 2

GPR processing steps and parameters.

Profile	Edit traces Extract	Dewow (ns)	Static correction (ns)	Time cut (ns)	Background removal (ns)	Migration (m/ns)	Conversion time to depth (m/ns)	AGC Gain (ns)
a	2998-5542	14	105.305	300	300	velocity = 0.09	velocity = 0.09	300
b	4703-5411	20	105.364	300	300	velocity = 0.09	velocity = 0.09	300
c	2998-5542	10.5	48.166	300	300	velocity = 0.09	velocity = 0.09	300
d	8502-11288	10	41.716	300	300	velocity = 0.09	velocity = 0.09	300
e	11575- 14359	5	41.572	300	300	velocity = 0.09	velocity = 0.09	300

Figure 4 shows generated radargrams for the interpretation of depositional environments through radarfacies. New processing steps were defined to generate these radargrams. A bandpass filter (Ormsby bandpass) was applied to Prism[®] 2.5 software, using data after background removal. The parameters used in this processing step for each profile are presented in Table 3. After application of band-pass filtering, the time-to-depth conversion was performed, and the AGC-type gain was again applied, according to parameters in Table 2. Image processing was also necessary, where the raster image was turned into vector format in Adobe Illustrator software, aiming at image quality for interpretation of different environments and radarfacies.

Table 3

Parameters for bandpass filtering.

Profile	a	b	c	d	e
	80 MHz	80 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz

Lower cut	40	40	50	100	200
Lower plateau	45	45	55	110	220
Upper plateau	120	120	170	250	500
Upper cut	100	100	200	300	600

4.1 Relationship between attenuation of signal and humidity

Signal amplitude plots for traces 68 and 67 in module are shown in Figure 2a, c, attenuation of the amplitude estimated by the least squares method in Figure 2b, d.

The constant attenuation value for the traces was determined from Eq. (3 - 4) (Fig. 2b, d). The value found is $\alpha = 0.36$ for trace 68 and $\alpha = 0.3$ for trace 67. Substituting the values of the attenuation constants found in Eq. (3 - 3), the attenuation curve of the signal at depth estimated by the method of least squares Fig. 2b, d. The values found for the attenuation constant are compatible with theoretical values (0.03 – 0.3) for saturated sands established by Annan (1992).

High amplitudes (around 24,000 mv) are observed in trace 68 (Fig. 2a) down to approximately 0.8 m. From this depth, the amplitude decreases, and at 3.6 m the amplitude becomes less than 4300 mv and tends to decrease with depth. The attenuation curve (Fig. 2b) shows attenuation behavior with depth; at a higher depth, the signal attenuation is larger.

The largest amplitudes are of the order of 32,000 mv in trace 67 (Fig. 2c) and present a more relevant fall after 0.5 m. In this profile, the greater amount of rainfall (114.4 mm) influenced the attenuation of the signal starting in the first meters of depth. From this depth, the amplitude decreases to approximately 12,000 mv, and the amplitude behavior is similar to that of trace 68 from the 3.6 m depth.

Water level was found at approximately 3.1 m in the drilling of hole FS 31. Below this depth, sand will be saturated, and water content will only influence the response of the GPR signal in the first meters of sand. This agrees with the observations of a significant decrease in signal amplitude from the 3.6 m depth.

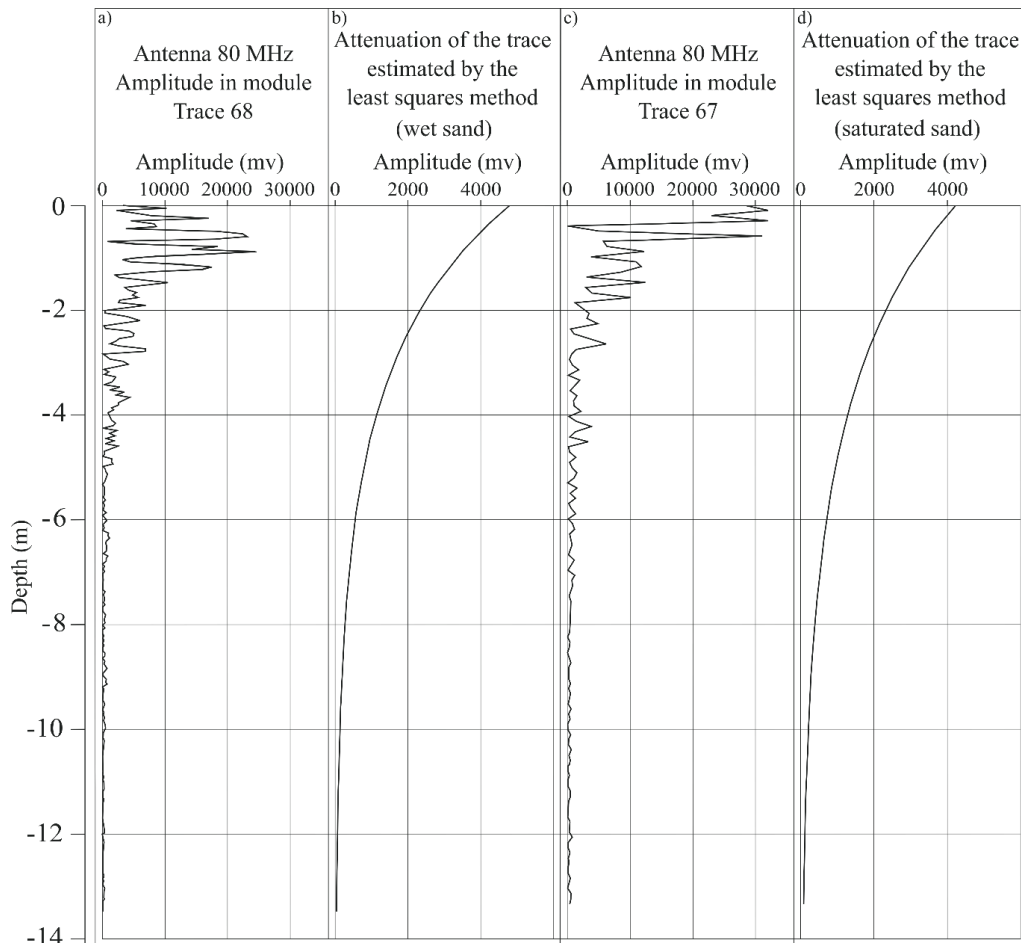


Fig. 2. Amplitude of signal in module and attenuation estimated by the least squares method for traces 68 and 67.

4.2 Relationship between signal amplitude, compaction and depositional environments

Coastal depositional environments in the foredune ridges were characterized by the behavior of signal amplitude in the selected traces and compaction (Fig. 3).

- 1) 80 MHz central frequency antenna traces (Fig. 3a,b) show the contact between backshore/foreshore (B) with upper shoreface (C) environments, marked by a

decrease in signal amplitude. The amplitude varies from 6,660 to 1,180 mv (Fig. 3a) and ~3,868 for 1,473 mv (Fig. 3b). From the depth of approximately 4.3 m, the amplitudes are low (<2,000 mv) and maintain a similar wavelength pattern. In spite of the presence of signal down to ~13 m, trace analysis does not distinguish the types of environments, evidencing that surveys with antennas of low frequencies reach greater depths but lose resolution in the signal.

- 2) The trace of the 100 MHz central frequency antenna (Fig. 3c) shows high amplitudes in the environment of foredune ridge (A), in the order of 14,800 mv. The contact between foredune ridge (A) and backshore/foreshore (B) environments is marked by decreased amplitude and increased compaction where the number of strokes to the 0.3 m penetration of the sampler increased from 5 to 45. The backshore/foreshore (B) and upper shoreface (C) environments show similar behavior in signal amplitude, and the difference in contact between these environments in the 100 MHz central frequency antenna trait remains undefined. From ~6.4 m, the signal amplitude decreases significantly at a depth of contact between upper shoreface (C) and lower shoreface (D). After 9 m depth, low amplitudes (around 1,800 mv) and small wavelengths were observed and considered noise.
- 3) In the 200 and 400 MHz central frequency antennas (Fig. 3d, e), the traces showed low amplitudes (<400 mv (Fig. 3d) and <2,500 mv (Fig. 3e) in the foredune ridge environment (A). The contact between the foredune ridge (A) and backshore/foreshore (B) environments is marked by an increase in amplitude in the order of 19,350 and 4,255 mv for the traces of 'd' and 'e' profiles, respectively. The contact between these environments is also marked by increased compaction, where the number of strokes for the 0.3 m penetration of the sampler increased from 5 to

45. Contact between upper shoreface (C) and lower shoreface (D) environments is marked by a decrease in amplitude values (around 2,133 and 3,335 mv). This contact is marked by the decrease in compaction from 35 to 20 strokes for penetration of the sampler. From the depth of ~10 m, the trace begins to present great variations in the amplitude and small wavelengths, considered noise.

Highest contrasting compaction is observed between low compaction of foredune ridge and swale and higher compaction in backshore/foreshore facies, coincident with observations by Dillenburg et al. (2011). This marked difference is related to processes of sedimentation of both facies. While foredunes formed by aeolian grain fall and flow and resulted in very high porosity (low compaction), backshore/foreshore facies were formed by swash and backswash wave action that resulted in a close grain arrangement with considerably lower porosity (high compaction). Variations in the amplitudes of the traces of the central frequency antennas 100, 200 and 400 MHz agree in depth with compaction of environments.

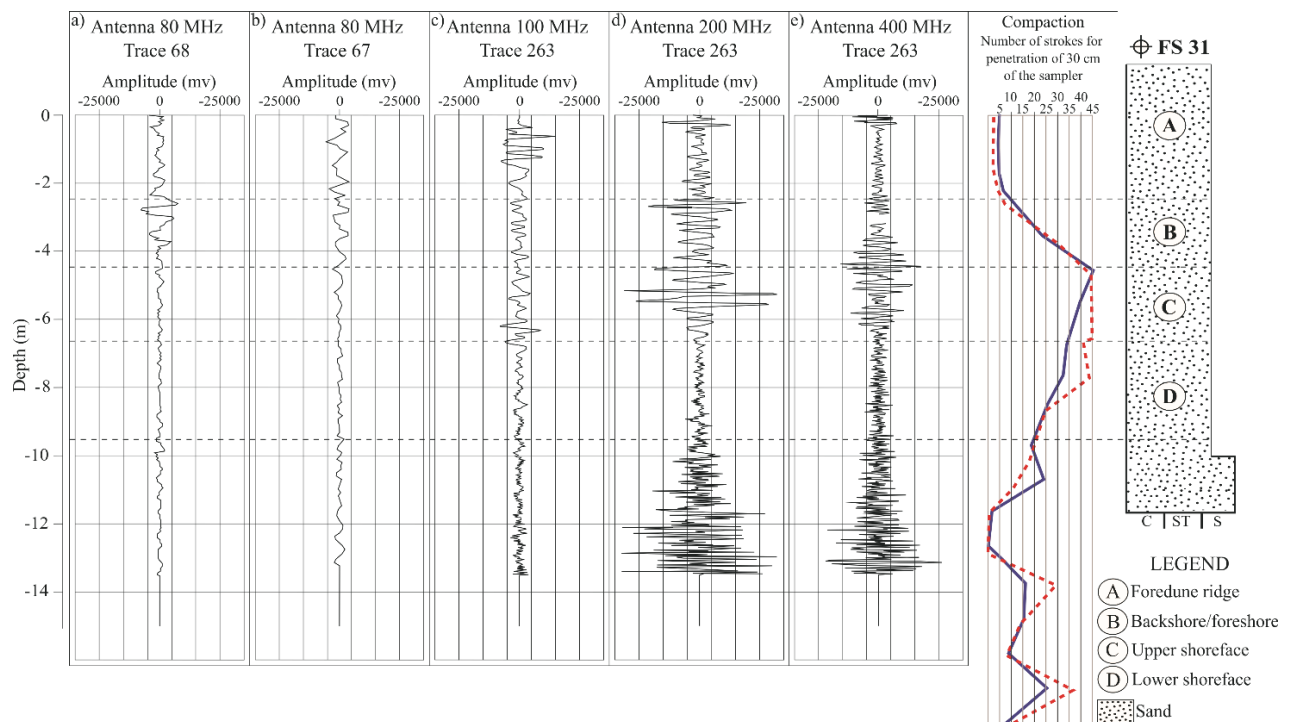


Fig. 3. Behavior of amplitude of traces, compaction data and lithological information of the drill hole (FS 31).

5. Discussion

The pioneering use of analysis of traces allowed the characterization of coastal depositional environments of southern Brazil, with relevance for studies in other continents. Variation in amplitude signals and changes in the degree of compaction determined by the SPT method allowed the characterization of contacts between coastal depositional environments in the Pinheira regressive barrier.

Traces of 200 and 400 MHz center frequency antennas showed increased amplitude at the contact between foredune ridge and backshore/foreshore environments. This contact is also marked by increased compaction, represented by the variation in the sedimentation processes of both environments. Lower amplitudes and decreased compaction mark the contact between upper shoreface and lower shoreface environments.





















SPT drilling system is method used for decades to determine subsurface geotechnical properties and is currently used in studies of stratigraphy and evolution of barriers (Dillenburg et al., 2006, 2011). Compaction degree obtained by the SPT drilling system is an excellent property used to distinguish between depositional environments of the Pinheira regressive barrier. Analysis of traces also contributed to differentiate these environments, due to well-defined variation in values of amplitude, mainly with antennas of 200 and 400 MHz central frequency.

5.1 Interpretation of environments through radargrams

The definition of reflector patterns from the profiles shown in Figure 4 followed the results of Barboza et al. (2009) and Dillenburg et al. (2011) for the Pinheira regressive barrier. The characteristics of radarfacies are summarized in Table 4.

Table 4

Patterns of reflectors and interpretation of environment.

Radarfacies					Description	Environment
80 MHz	80 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz		
					Non-continuous and high-angle undulated reflectors at ridges and low contrast to transparent reflectors at swales	Foredune ridge and swale A
					Reflectors continuous, sub-parallel and low angle	Backshore/foreshore B
					Reflectors undulating, non-continuous and with concave/convex pattern	Upper shoreface C
					Continuous, sub-parallel and low angle reflectors	Lower shoreface D

The 80 MHz central frequency antenna (Fig. 4a, b) allowed identification of radarfacies patterns down to a depth of 12 m and interpretation of four depositional environments.

However, the resolution is low for radarfacies of greater detail. This is also the behavior of traces for the 80 MHz central frequency antenna, which present signal down to ~13 m. From the analysis of the trace, the types of environments remain unresolved due to the resolution of the signal.

In the 100 MHz central frequency antenna (Fig. 4c), the four depositional environments described can be observed with higher resolution. Contact and differentiation between radarfacies patterns for backshore/foreshore (B) and upper shoreface (C) environments are unclear, as shown in trace analysis (Fig. 3c).

The 200 MHz, central frequency antenna, was considered the adequate antenna to define the four depositional environments (Fig. 4d). All radarfacies patterns and contacts with environments are shown with high resolution. This antenna showed the foredune ridge and swale deposits, succeeded by backshore/foreshore reflectors, upper shoreface and lower shoreface at the base.

In the radargram for the 400 MHz central frequency antenna (Fig. 4e), the foredune ridge and swale, backshore/foreshore and upper shoreface environments were identified with higher resolution. For this antenna, the lower shoreface (D) environment remained undefined with radarfacies. As observed in the behavior of the traces for the 200 and 400 MHz central frequency antennas, the signal begins to present noise at depths of ~10 m. In the radargrams, this noise is present starting at 9 m for the 200 MHz central frequency antenna (Fig. 4d) and 7 m for the 400 MHz central frequency antenna (Fig. 4e).

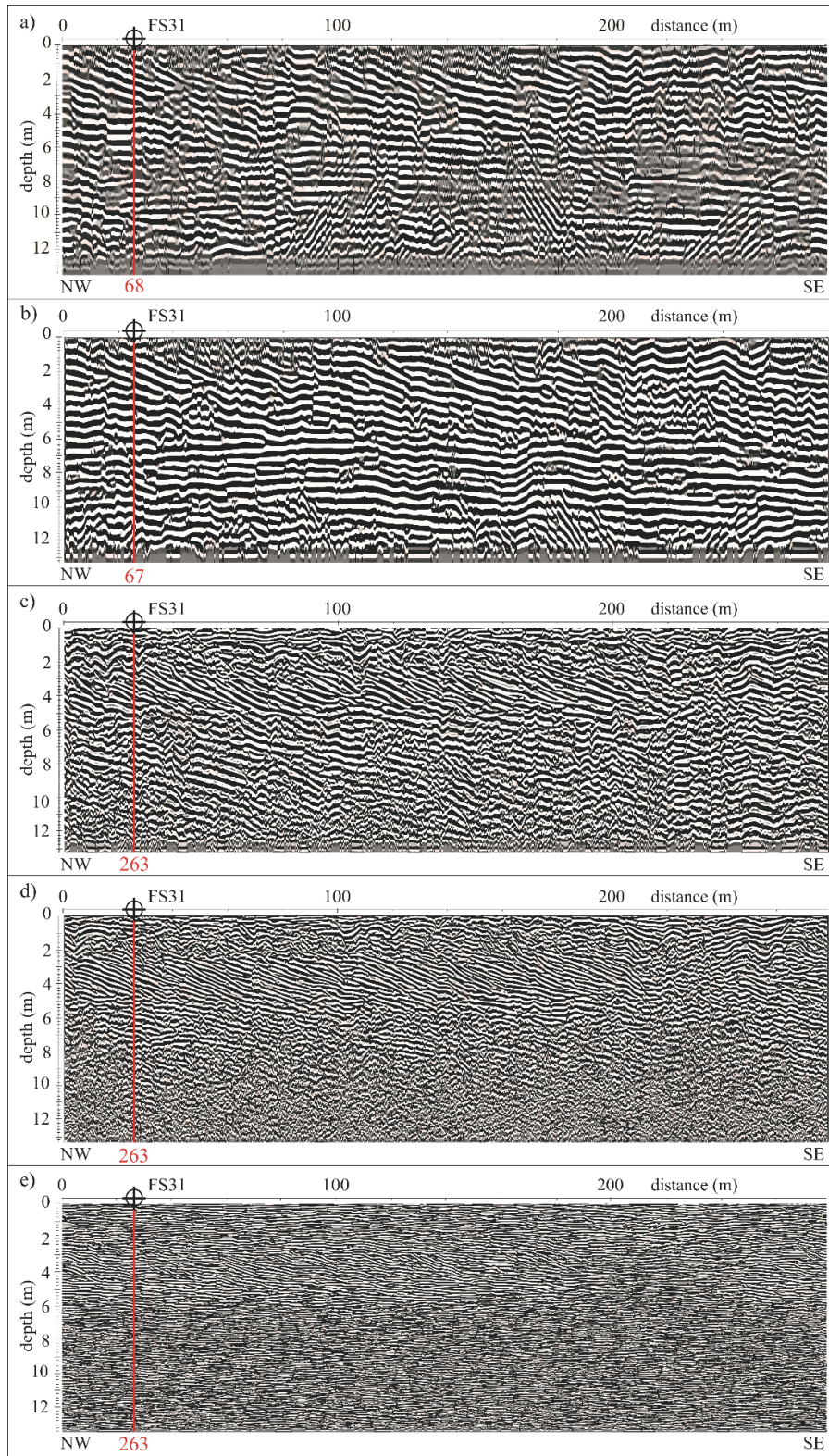


Fig. 4. GPR profiles for 80, 100, 200 and 400 MHz central frequency antennas, showing the location of the drill hole and traces chosen for analysis.

6. Conclusions

The analysis of GPR profiles with different antennas was integrated with compaction results and resulted in an effective tool for the recognition of classical depositional environments known as regressive barriers. In the analysis of traces and radargrams, the 200 MHz central frequency antenna showed the highest resolution for characterization of the four depositional environments. Low-frequency antennas (80 and 100 MHz) reach higher depths in sandy deposits and may thus show deposits of lower shoreface. The interference of humidity in attenuation of signal in the studied data can be observed only in the first 0.5 m. Rainfall was not relevant for signal attenuation in the studied sandy deposits with water level close to the surface.

Acknowledgment

This research was funded by a scholarship from CNPq (Number 830364/1999-4) to Carolina G. Leandro.

References

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711-728.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Angulo, R.J., Giannini, P.C.F., Suguio, K., Pessenda, L.C.R., 1999. Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid ^{14}C ages. *Marine Geology* 159, 323- 339.

- Angulo, R.J., Lessa, G.C., Souza, M.C., 2006. A Critical Review of Mid- to Late Holocene Sea-Level Fluctuations on the Eastern Brazilian Coastline. *Quaternary Science Reviews* 25, 486-506.
- Annan, A.P., 1992. Ground penetrating radar workshop notes. Sensors and Software, Incorporated, Mississauga, Ontario, 150 pp.
- Baker, G.S., Jol, H.M., 2007. Stratigraphic analyses using GPR. Special Paper 432. The Geological Society of America. 181 pp.
- Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Rosa, M.L.C.C., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., 2009. Ground-penetrating radar profiles of two regressive barriers in southern Brazil. *J. of Coastal Research SI* 56, 579-583.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., 2011a. Comportamento regressivo/transgressivo da linha de costa na bacia de Pelotas durante o Holoceno médio e tardio. In: López, R.A., Marcomini, S.C., (Ed.). *Problemática de Los Ambientes Costeiros*. Buenos Aires, Croquis, pp. 15-30.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., 2011b. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *J. of Coastal Research SI* 64, 646-650.
- Barboza, E.G. Rosa, M.L.C.C. Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., 2013. Preservation Potential of Foredunes in the Stratigraphic Record. *J. of Coastal Research SI* 65, 1265-1270.
<https://doi.org/10.2112/SI65-214.1>
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Biancini da Silva, A., Tomazelli, L.J., 2014a. Stratigraphic analysis applied on the recognition of the interface between marine

and fluvial depositional systems. *J. of Coastal Research SI 70*, 205-210.

<https://doi.org/10.2112/SI70-116.1>

Barboza, E.G., Rosa M.L.C.C., Caron, F., 2014b. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. Resumos Expandidos 1, 1-6.

<https://doi.org/10.13140/2.1.3369.5047>.

Biancini da Silva, A., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., 2014. Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *J. of Coastal Research SI 70*, 687-692. <https://doi.org/10.2112/SI70-035.1>

Cassidy, N.J., 2009. Ground penetrating radar data processing, modeling and analysis. In: Jol, H. (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier Science & Technology, Oxford, UK, pp: 141-176.

Conyers, L.B., 2004. *Ground-penetrating Radar for Archaeology* Alta Mira Press. Walnut Creek, 224 pp.

Cooper, J.A.G., Meireles, R.P., Green, A.N., Klein, A.H.F., Toldo, E.E., 2018. Late Quaternary stratigraphic evolution of the inner continental shelf in response to sea-level change, Santa Catarina, Brazil. *Marine Geology* 397, 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.11.011>

Daniels, D.J., 2004. *Ground Penetrating Radar*, second ed IET, London, UK. 726 pp.

Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospect.*, 37, 531-551.

Dias, J.L., Sad, A.R.E., Fontana, R.L., Feijó, F.J., 1994. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências da Petrobras* 8, 235-245.

- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., 2014. The Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P.; Wanless H.R. (Eds.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. Geological Society, London. Special Publications 388, 333-352.
- Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P, Silva, D.B., 2006. Stratigraphy and Evolution of a Prograded Barrier in Southern Brazil. *J. of Coastal Research*, SI 39, 131-134
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Hesp, P.A., Rosa, M.L.C.C., 2011. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *J. of Coastal Research* SI 64, 651-655.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Hesp, P.A., Rosa, M.L.C.C., Angulo, J.R., Souza, M.C., Gianinni, P.C.F., Sawakuchi, A.O., 2014. Discussion: "Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: implications for complex response to environmental change" by Hein, et al., 2013. *Sedimentology* 60, 469–502. A transgressive barrier at Pinheira, Southern Brazil around 3 ka? *Sedimentology* 61, 2205-2212. <https://doi.org/10.1111/sed.12132>
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Sawakuchi, A.O., 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brasil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7-6 ka. *Marine Geology* 390, 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.06.007>
- Gawthorpe, R.L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Leeder M.R., Bridge J.S., 1993. *Ground Penetration Radar: application to sand body geometry and heterogeneity studies*. Geological Society. London. Special Publication 73, 421-432.

- Hein, C.J., FitzGerald, D.M., Cleary, W.J., Albernaz, M.B., Menezes, J.T., Klein, A.H.F., 2013. Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: Implications for complex coastal response to environmental change. *Sedimentology* 60, 469-502.
- Hesp, P.A., Giannini, P.C.F., Martinho, C.T., Silva, G.M., Asp, N.E., 2009. The Holocene Barrier Systems of the Santa Catarina Coast, Southern Brazil. In: *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.), *Lect. Notes Earth Sci.*, 107, 93-133.
- INMET. 2017. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. (accessed 07 de June 2017).
- Jol, H.M., Bristow, C.S., 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: Bristow, C.S., JOL, H.M., (Eds.), *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society. London Special Publications 211, 09-27.
- Klein, A.H.F., Mocellim, O., Menezes, J.T., Berribilli, M., Vintém, G., Dafferner, G., Diehl, F.L., Sperb, R.M., Santana, G.G., 2005. Beach Safety Management on the Coast of Santa Catarina, Brazil. *Zeitschrift für Geomorphologie* 141, 47-58.
- Leal, R.A., Barboza, E.G., Bitencourt, V.JR., Biancini da Silva, A., Manzolli, R.P., 2016. Geological and Stratigraphic Characteristics of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil: GIS and GPR Applied for Evolution Analysis. *Journal of Coastal Research* SI 75, 750-754. <https://doi.org/10.2112/SI75-151.1>

- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261-330.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Oliveira, J.F., Barboza, E.G., Benavente, J., 2016. Nearshore Dynamics and Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil. *J. of Coastal Research SI 75*, 437-441. <https://doi.org/10.2112/SI75-088.1>
- Oliveira Jr. J.G., Tabosa, W.F., Medeiros, W.E., Vital H., Stattegger K., 2003b. Imageamento de depositos eólicos modernos e influência da granulometria sobre dados de GPR. 8th International Congress of Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro/RJ. CD-ROM.
- Oliveira Jr, J. G.; Medeiros, W. E., 2008. Influência do conteúdo de água, granulometria e minerais pesados sobre as reflexões de GPR em corpos arenosos inconsolidados. *Rev. Brasileira de Geofísica* 26(4), 437-449. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400005>
- Rockett, G.C., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., 2016. Ground Penetrating Radar applied to the characterization of the Itapeva Dunefield, Torres, Brazil. *J. of Coastal Research SI 75*, 323-327. <https://doi.org/10.2112/SI75-065.1>
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *J. of Coastal Research SI 64*, 686-690.
- Rosa, M.L.C.C., Hoyal, D.C., Barboza, E.G., Fedele, J., Abreu, V.S., 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. In: Budd, D.A., Hajek, E.A., Purkis, S.J. (Eds.), *Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems*. SEPM Special Publication 106, 176-197.

- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Abreu, V.S., Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., 2017. High-frequency sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian J. of Geology* 47(2), 183-207. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160138>
- Scarelli, F.M., Barboza, E.G., Cantelli, L., Gabbianelli, G., 2017. Surface and subsurface data integration and geological modelling from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea. Emilia-Romagna, Italy. *Catena* 151, 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.005>
- Silveira, L., Klein, A.H.F., Tessler, M., 2011. Classificação morfodinâmica das praias do estado de Santa Catarina e do litoral Norte do Estado de São Paulo utilizando sensoriamento remoto. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology* 15(2), 13-28.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., LOSS, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Filho, N.O., Bachi, F.A., Denhardt, B.A., 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 4, 79-97.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente estudo contribuem para a parametrização Geofísica de diferentes ambientes deposicionais em barreiras regressivas, como no caso da Pinheira.

A análise dos traços selecionados nos perfis levantados com diferentes frequências centrais de antenas, permitiu definir o contato entre os cordões litorâneos, *backshore/foreshore* e *shoreface* superior e inferior, a partir da variação da amplitude (aumento ou decréscimo) do sinal e comprimento de onda. A identificação desses contatos foi sustentada pela compactação definida a partir do furo de sondagem presente na área, onde a mudança de ambientes de baixa para alta compactação, corresponde com variações na amplitude.

A identificação dos padrões de radarfácies nos perfis estudados mostrou que a antena com frequência central de 200 MHz é a que demonstra maior resolução para caracterização dos ambientes deposicionais descritos por Barboza *et al.* (2009) e Dillenbug *et al.* (2011), para a barreira regressiva da Pinheira.

A antena com frequência central de 80 MHz apresentou padrões de radarfácies até a profundidade de 12 m, e também possibilitou a identificação dos quatro ambientes deposicionais. Porém, não apresenta qualidade na resolução para as radarfácies de maior detalhe (cordões litorâneos, *backshore/foreshore*). O comportamento dos traços para esta antena apresentou sinal até a profundidade de ~13 m, porém a partir da análise da amplitude do sinal nos traços, não foi possível distinguir os tipos de ambientes devido a resolução do sinal.

Na antena com frequência central de 100 MHz, os quatro ambientes deposicionais descritos puderam ser observados com maior resolução. O contato e a diferenciação entre o padrão de radarfácies para os ambientes de *backshore/foreshore* e *shoreface* superior não foi muito nítido, como também pode ser observado na análise do traço.

No radargrama para a antena com frequência central de 400 MHz, identificou-se com maior resolução os ambientes de cordões litorâneos, *backshore/foreshore*, e baixa resolução a *shoreface* superior. Para esta antena não foi possível identificar através das radarfácies o ambiente de *shoreface* inferior.

Conforme observado no comportamento dos traços para as antenas de 200 e 400 MHz, o sinal começa a apresentar ruído a profundidades de ~10 m. Nos radargramas esses ruídos estão presentes a partir das profundidades de -9 m para a antena de 200 MHz e de -7 m para a antena de 400 MHz.

A interferência da umidade na atenuação do sinal nos dados estudados pode ser observada apenas nos primeiros 0,5 m. Demonstrando que em ambientes arenosos onde o nível da água é próximo a superfície, a pluviosidade não é um fator de relevância para atenuação do sinal.

A análise da amplitude do sinal nos traços de perfis de GPR, realizados com diferentes frequências centrais de antenas, em conjunto com resultados de compactação, demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o reconhecimento dos ambientes deposicionais clássicos já descritos em barreiras regressivas.

Sugere-se para pesquisas futuras, novas aquisições de dados com outras antenas de frequências centrais, para confirmar o comportamento dos traços nos contatos entre os ambientes deposicionais para baixas e altas frequências. Além disso, definir parâmetros ideais para os levantamentos que visem a melhor qualidade dos dados.

ANEXO

24/01/2018 Chasque Webmail :: Successfully received: submission GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil for Jo...

Assunto **Successfully received:
submission GPR trace
analysis for coastal
depositional environments of
southern Brazil for Journal of
Applied Geophysics**



Remetente Journal
of Applied Geophysics
<EvisSupport@elsevier.com>

Para <carolina.leandro@ufrgs.br>

Responder para <appgeo-eo@elsevier.com>

Data 2018-01-24 16:15

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: APPGEO_2018_58

Title: GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil

Journal: Journal of Applied Geophysics

Dear Miss. Gonçalves Leandro,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of Applied Geophysics. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® at:
http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=APPGEO and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting

your work to this journal.

Kind regards,

Journal of Applied Geophysics

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [CustomerSupport](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

----- Copyright

© 2018 Elsevier B.V. | [Privacy](#)

[Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.