

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

**USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLÓGICOS E
GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO AQUÍFERO ASSOCIADO AOS
DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE
CASSINO/RS**

ELIEGE ALVES DO NASCIMENTO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

COORIENTADOR – Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

Porto Alegre, 2022

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

**USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLÓGICOS E
GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO AQUÍFERO ASSOCIADO AOS
DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE
CASSINO/RS**

ELIEGE ALVES DO NASCIMENTO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

COORIENTADOR – Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Franciéle Schwanck Carlos – Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Felipe Caron – Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dr. Marcos Alexandre de Freitas – Serviço Geológico do Brasil, SGB/CPRM

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Nascimento, Eliege Alves do
USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLOGICOS E
GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA NO AQUIFERO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS
EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE CASSINO/RS / Eliege
Alves do Nascimento. -- 2022.
93 f.

Orientador: Eduardo Guimarães Barboza.

Coorientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2022.

1. Fluxo de água subterrânea. 2. Hidrogeologia. 3.
Aqüíferos costeiros. I. Guimarães Barboza, Eduardo,
orient. II. Roehe Reginato, Pedro Antonio, coorient.
III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram das mais variadas formas para a conclusão de mais esta grande etapa em minha vida.

RESUMO

O comportamento do fluxo e os padrões de circulação da água subterrânea em aquíferos costeiros podem ser influenciados localmente por diversos fatores, tais como: geológicos/geomorfológicos, topográficos, hidrogeológicos, climáticos e antrópicos. No Balneário do Cassino, região sul do litoral do Rio Grande do Sul, o Sistema Aquífero Costeiro (SAC) tem grande importância, porém os estudos hidrogeológicos são ainda escassos e de escala regional. Sendo assim, esse trabalho teve como objetivo avaliar o sentido de fluxo da água subterrânea associado ao pacote de sedimentos eólicos que fazem parte desse sistema aquífero, bem como identificar os fatores que o controlam. Para isso foram levantados e analisados dados de sondagens, de poços de monitoramento e variações mensais dos níveis de águas já existentes. Também foram realizados levantamentos de perfis geofísicos de georradar, que possibilitaram melhorar a avaliação da espessura e da geometria das diferentes camadas de sedimentos que ocorrem em subsuperfície. Os resultados permitiram caracterizar as litologias encontradas, identificar a arquitetura deposicional dos estratos em subsuperfície, delimitar os ambientes de sedimentação, analisar o comportamento das variações dos níveis estáticos e da potenciometria e determinar quais são os fatores que controlam o fluxo de água subterrânea no aquífero associado aos depósitos eólicos holocênicos. A partir dos resultados foi possível identificar que a morfologia do terreno, as características texturais e geotécnicas dos sedimentos e o padrão de empilhamento das camadas são os fatores que condicionam localmente o sentido de fluxo no aquífero associado a esse pacote. Dessa forma, esse estudo contribuiu significativamente no aumento do conhecimento hidrogeológico da região e demonstrou que o fluxo de água, mesmo em regiões próximas à linha de costa, pode ocorrer em diferentes sentidos devido ao mesmo estar condicionado localmente por outros fatores.

Palavras-chave: fluxo de água subterrânea; hidrogeologia; aquíferos costeiros.

ABSTRACT

The flow behavior and the patterns of groundwater circulation in coastal aquifers can be influenced locally by various factors such as: geological, geomorphological, topographic, hydrogeological, climatic, and anthropic. At Balneario Cassino, south coast of Rio Grande do Sul, the Coastal Aquifer System (SAC) has great importance, although the hydrogeological studies are still quite a few and on a regional scale. Thus, this work had as a goal to evaluate the direction of groundwater flow linked to aeolian sediment layers, as well, as to identify the elements that control it. For that, it prospected and analyzed the results of geological survey drill holes, monitoring water wells and their water levels existing data. Also, were being carried out ground penetrating radar surveys of geophysical profiles, which made it possible to improve the evaluation of thickness measurement and the geometry of different layers of sediments that occur at the surface underneath. The results allowed us to characterize the lithologies found, identify the depositional architecture of the surface underneath strata, the demarcation of the sediment environment, analyze the behavior of static levels variability and flow power metrics, also to determine which factors control the groundwater flow inside the aquifer associated to the Holocene Aeolian deposits. From the results, it was possible to identify the terrain's morphology, the texture e geotechnical characteristics of the sediments, and, the pattern of packing layers; these are factors that locally determine the aquifer's flow linked to such package. By the way, this study contributed significantly to the hydrological knowledge enlargement in the region and demonstrated that the water flow, even in regions nearby the coastline, may occur in different directions due water flow to being locally determined by other factors.

Keywords: groundwater flow; hydrogeology; coastal aquifer.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa geológico/geomorfológico da planície costeira do RS, delimitação da área de estudo e perfil geológico esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais encontrados no setor norte da PCRS (adaptado de Dillenburg & Barboza, 2014; Rosa et al., 2017; Bitencourt et al., 2020). 16
- Figura 2. Planície costeira inserida dentro do contexto hidrogeológico e identificação da área de estudo (adaptado de Machado & Freitas, 2005). 18
- Figura 3. Mapa de localização da área de estudo situada no Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).... 24
- Figura 4. Mapa geomorfológico do embaiamento Rio Grande/Cassino-RS. Detalhe para a área de estudo e dos poços de monitoramento construídos para o trabalho de Nascimento (2013) (adaptado de Dillenburg et al., 2017). 27
- Figura 5. Perfis obtidos com base em poços de monitoramento da unidade aquífera Barreira Holocênica com a identificação das litologias que compõe cada camada e seu respectivo ambiente (Nascimento, 2013). 29
- Figura 6. Fluxograma com a metodologia aplicada nesse estudo 30
- Figura 7. Localização das sondagens, poços de monitoramento e perfis de GPR executados na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022). 35
- Figura 8. Croqui com localização das sondagens utilizadas na seção geológica da área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022). 36
- Figura 9. Seção geológica mostrando a variação textural dos sedimentos e o grau de compactidade para o intervalo analisado 37
- Figura 10. Localização das seções de georadar e geológica. A) Localização das sondagens utilizadas na seção e do perfil geofísico completo vs. perfil processado/interpretado (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022); B) Seção geológica utilizada na correlação lateral com o perfil de GPR (elaborado pela autora). 38
- Figura 11. Detalhe da seção de georadar. A) Registro de GPR processado (elaborado pela autora); B) Identificação das terminações dos refletores e delimitação das superfícies (elaborado pela autora); C) Interpretação dos ambientes: I – Antepraia Superior; II Pós-praia/estirâncio; IIIA/IIIB Unidade eólica (elaborado pela autora).... 39
- Figura 12. Mapa topográfico obtido através do software SURFER com base na integração dos dados das altitudes dos poços e das seções de GPR (elaborado pela autora)..... 40
- Figura 13. Localização dos poços de monitoramento presentes na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022). 42
- Figura 14. Perfil construtivo adotado para cada um dos poços de monitoramento .. 43

Figura 15. Perfil hidrogeológico e construtivo elaborado a partir de dados de sondagem e poço de monitoramento executados na área de estudo	44
Figura 16. Dados pluviométricos (INMET) para o município de Rio Grande	45
Figura 17. Mapas potenciométricos para os meses de outubro 2010 (9mm) e novembro 2010 (38mm) com seus acumulados mensais de pluviometria	48
Figura 18. Mapas potenciométricos para os meses de dezembro 2010 (39mm) e janeiro 2011 (31mm) com seus acumulados mensais de pluviometria	49
Figura 19. Mapas potenciométricos para os meses fevereiro 2011 (130mm) e março 2011 (279mm) com seus acumulados mensais de pluviometria	50
Figura 20. Mapas potenciométricos para os meses de abril 2011 (97mm) e maio 2011 (142mm) com seus acumulados mensais de pluviometria	51
Figura 21. Mapas potenciométricos para os meses de junho 2011 (126mm) e julho 2011 (36mm) com seus acumulados mensais de pluviometria	52
Figura 22. Mapa potenciométrico para o mês de agosto 2011 (89mm) com seu acumulado mensal de pluviometria	53
Figura 23. Perfil esquemático da seção geológica	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização e cotas dos poços de monitoramento.....	41
Tabela 2. Dados de N.A. obtidos através do monitoramento dos níveis de água entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.	45
Tabela 3. Dados estatísticos dos níveis de água.	46
Tabela 4. Dados das cargas hidráulicas obtidas através do monitoramento dos níveis de água entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.	46
Tabela 5. Dados estatísticos das cargas hidráulicas.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS	14
3	ESTADO DA ARTE	15
3.1	Contexto Geológico e Geomorfológico da Planície Costeira	15
3.2	Contexto Hidrogeológico da Região Costeira.....	17
3.3	Circulação da Água Subterrânea com Ênfase em Aquíferos Costeiros	19
3.4	Uso de Georadar em Avaliações Geológicas e Hidrogeológicas	22
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
4.1	Localização.....	24
4.2	Clima, ventos, ondas e marés.....	24
4.3	Geologia e Geomorfologia	25
4.4	Hidrogeologia.....	28
5	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	30
5.1	Revisão bibliográfica e obtenção de dados existentes.....	30
5.2	Aquisição de dados geofísicos (GPR), processamento e interpretação. ..	31
5.3	Caracterização geológica e topográfica	32
5.4	Caracterização hidrogeológica.....	33
5.5	Avaliação do fluxo e circulação da água subterrânea.....	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1	Caracterização geológica e morfológica dos depósitos eólicos.....	35
6.2	Caracterização hidrogeológica da unidade eólica.....	41
6.3	Avaliação do fluxo de água subterrânea na camada aquífera eólica.....	46
7	CONCLUSÕES.....	55
8	REFERÊNCIAS	57
9	ARTIGO SUBMETIDO	68
	ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO	93

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em um artigo submetido à Revista *Águas Subterrâneas* classificada nos estratos Qualis-CAPES em B2. A sua organização compreende as seguintes partes principais:

TEXTO INTEGRADOR:

Texto Integrador composto pelos seguintes capítulos: a) introdução com a formulação do problema de investigação e a hipótese; b) objetivos da pesquisa; c) estado da arte do tema da pesquisa; d) caracterização da área de estudo; e) materiais e métodos utilizados; f) resumo dos principais resultados obtidos e discussão integradora dos resultados; g) conclusões; h) referências bibliográficas.

ARTIGO:

Constitui o corpo principal desta dissertação e apresenta o artigo intitulado: **“Avaliação do fluxo da água subterrânea do aquífero associado aos depósitos eólicos holocênicos na região do Cassino/RS”** com a versão integral do artigo submetido à Revista *Águas Subterrâneas*.

COMPLEMENTOS:

Em anexo segue a carta de submissão do artigo.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de aquíferos costeiros é de suma importância, pois em regiões litorâneas o uso de água subterrânea para o consumo humano e atividades ligadas à agricultura, indústria e comércio é expressivo, sendo que a demanda por esse recurso hídrico tem aumentado significativamente em consequência do crescimento populacional dessas áreas (Chandrajith *et al.*, 2014). A maioria dos estudos desenvolvidos estão relacionados apenas com a avaliação hidrogeológica quantitativa e qualitativa, sendo muitos deles associados exclusivamente na identificação e análise da cunha salina.

O conhecimento e a avaliação sobre o fluxo da água subterrânea em aquíferos costeiros também possuem grande relevância para subsidiar os processos de gerenciamento desse valioso recurso natural. O fluxo de água nos sistemas aquíferos é governado pelo gradiente hidráulico, sendo que nos aquíferos costeiros o gradiente existente propicia uma circulação regional e preferencial da água subterrânea, que ocorre do continente para o oceano (Manoel Filho, 2008). No entanto, o fluxo de água subterrânea pode ser influenciado localmente por diversos fatores, tais como: geológicos/geomorfológicos (espessuras, geometrias e estruturas das camadas, granulometria, grau de consolidação dos sedimentos e formas de relevo), topográficos (variações altimétricas da superfície do terreno), hidrogeológicos (variações nos processos de recarga), climáticos (precipitação pluviométrica), antrópicos (exploração da água subterrânea sem controle), entre outros.

O estudo realizado por Rocha *et al.* (2015) avaliou a descarga de água subterrânea (DAS) na região norte do litoral do Rio Grande do Sul, tendo identificado que o fluxo é influenciado pelos processos de infiltração e advecção que ocorrem entre a região da encosta e a planície costeira. Os autores identificaram uma relação entre os aquíferos e as lagoas, com uma contribuição significativa da descarga da água subterrânea para as lagoas. Em continuidade a esses estudos, Rocha (2018) avaliou as conexões e interações entre a água superficial e subterrânea no litoral norte do RS. A autora identificou que a DAS é influenciada pela evolução e comportamento geológico (padrões de empilhamento estratigráfico progradacional e retrogradacional) dos sedimentos que formam as barreiras. Foi evidenciado que as variações na compactação, estrutura, granulometria e descontinuidades das camadas tem influência nos processos de descarga da água subterrânea, bem como no transporte de nutrientes.

Na região sul do litoral, no Balneário do Cassino (Rio Grande/RS), o sistema aquífero costeiro tem grande importância, porém os estudos hidrogeológicos são mais escassos e de escala regional, como por exemplo os realizados por Hausman (1995) e Machado & Freitas (2005). Um estudo mais detalhado foi desenvolvido por Nascimento (2013), que avaliou as características hidrogeológicas e hidroquímicas da camada aquífera associada aos depósitos holocênicos existentes na região. No entanto, os estudos realizados abordaram de forma muito preliminar as condições de fluxo da água subterrânea.

Tendo em vista os resultados dos estudos anteriores e a premissa de que uma série de fatores tenha influência sobre o fluxo de água subterrânea, levantou-se a hipótese de que, mesmo em regiões próximas à linha de costa, sejam encontrados fluxos em sentido divergente ao do oceano.

Para avaliar esta hipótese, é apresentado um estudo hidrogeológico com avaliação do fluxo de água relacionado ao aquífero associado aos pacotes eólicos na região do Balneário do Cassino. Esses pacotes são parte do Sistema Aquífero Costeiro. A pesquisa envolve a análise da morfologia dos depósitos eólicos, a arquitetura deposicional, a avaliação hidrogeológica e as variações de nível da água subterrânea, a fim de identificar o comportamento do fluxo da água subterrânea e os fatores que o condicionam. Os resultados obtidos permitiram identificar o padrão de empilhamento estratigráfico dos estratos em subsuperfície, analisar o comportamento das variações do nível estático e da potenciometria. Com isso, foi possível avaliar em maior detalhe o comportamento do fluxo e os padrões de circulação da água subterrânea para a área, bem como confirmar a hipótese de que o sentido preferencial de fluxo no aquífero associado aos pacotes eólicos é influenciado por fatores geológicos e topográficos.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal identificar o sentido de fluxo da água subterrânea associado ao pacote de sedimentos eólicos e determinar os fatores que o controlam.

Os objetivos específicos relacionados a essa investigação foram:

- Reconhecer e descrever a arquitetura deposicional e o padrão de empilhamento dos depósitos presentes em subsuperfície, com enfoque no sistema eólico.
- Realizar a caracterização hidrogeológica da unidade aquífera associada ao pacote em estudo.
- Identificar e avaliar as cargas hidráulicas e o sentido de fluxo da água subterrânea na camada aquífera associada aos sedimentos eólicos.
- Interpretar e descrever os parâmetros que controlam as diferentes direções de fluxo da água nessa unidade.

3 ESTADO DA ARTE

3.1 Contexto Geológico e Geomorfológico da Planície Costeira

A Província Costeira do Rio Grande do Sul, de acordo com Villwock & Tomazelli (1995), é formada por duas unidades principais: o Embasamento e a Bacia de Pelotas. O Embasamento é caracterizado por rochas ígneas e metamórficas do Escudo Sul-Rio-Grandense e por Sequências Sedimentares e Vulcânicas da Bacia do Paraná, fazendo parte do domínio geomorfológico das Terras Altas. Já a Bacia de Pelotas é formada por um espesso pacote sedimentar de origem clástica terrígena e constitui o domínio das Terras Baixas. Esses sedimentos foram erodidos de regiões próximas à Bacia e retrabalhados por processos internos de cada sistema, associados com a dinâmica global e costeira. Dessa forma, foram gerados os sistemas deposicionais da planície costeira do RS (PCRS), presentes na porção emersa da Bacia de Pelotas.

De acordo com Villwock *et al.* (1986), a PCRS desenvolveu-se através do acúmulo de sedimentos em dois principais tipos de sistemas deposicionais: um sistema de leques aluviais, que está presente em uma faixa contínua ao longo da parte mais interna da planície, e de quatro distintos sistemas deposicionais transgressivos-regressivos do tipo Laguna-Barreira que se estendem até a atual linha de costa (Fig. 1). Os sistemas do tipo Laguna-Barreira são denominados de I, II, III (Idades pleistocênicas) e IV (Idade holocênica).

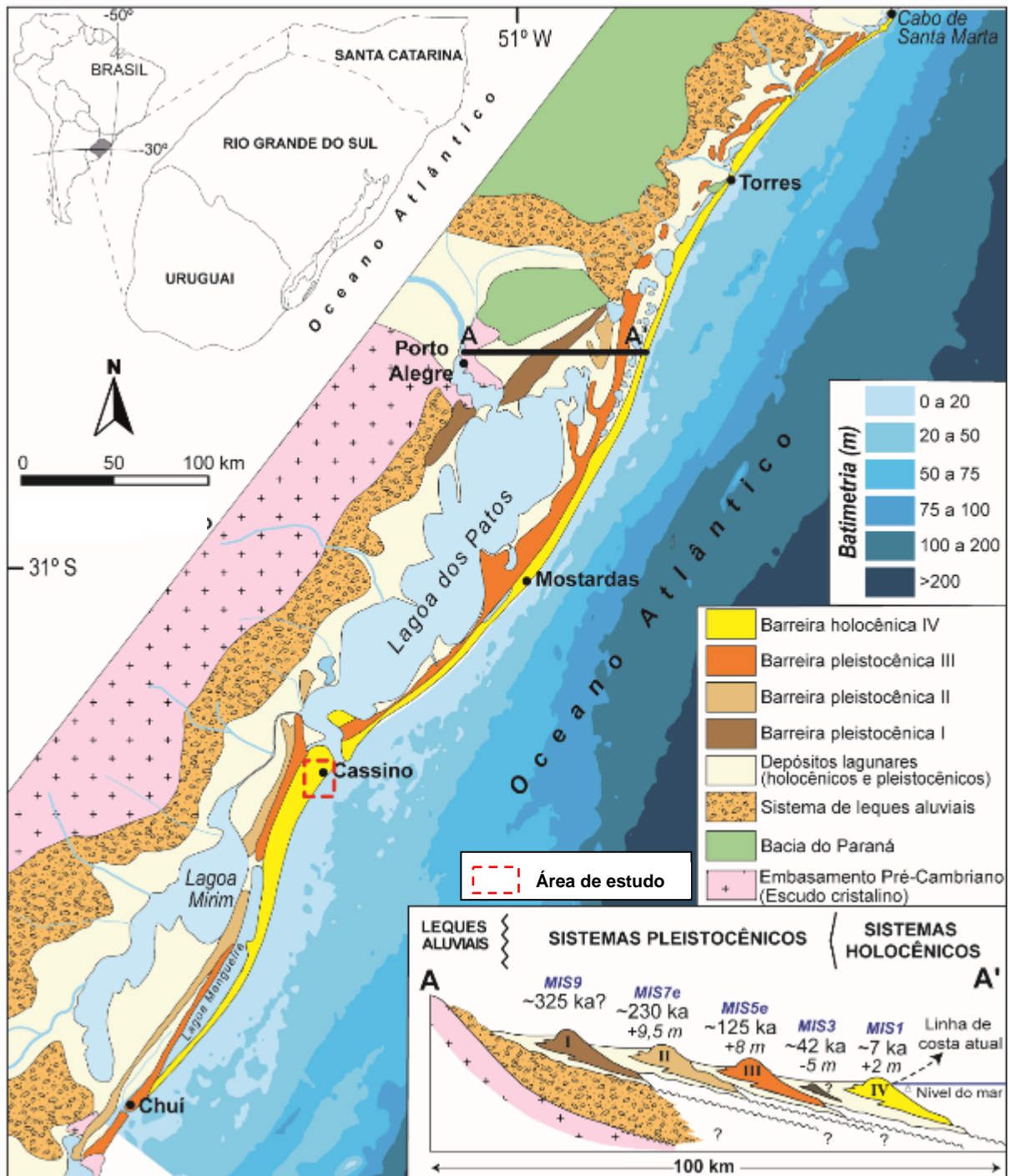


Figura 1. Mapa geológico/geomorfológico da planície costeira do RS, delimitação da área de estudo e perfil geológico esquemático (W-E) transversal aos sistemas deposicionais encontrados no setor norte da PCRS (adaptado de Dillenburg & Barboza, 2014; Rosa *et al.*, 2017; Bitencourt *et al.*, 2020).

Conforme Rosa *et al.* (2011, 2017) os sistemas Laguna-Barreira I, II e III foram formados durante as variações relativas do nível do mar ao longo do Pleistoceno, e apresentam intervalo de tempo cíclico, entre cada um, de aproximadamente 100 mil anos. Esse intervalo de tempo foi estimado através da correlação com os estágios isotópicos de oxigênio: onde, a Barreira I (aprox. 325 ka A.P) possui seu registro preservado e exposto na porção norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul

(PCRS) (Villwock & Tomazelli, 1995), enquanto que o registro da Barreira II (aprox. 240 ka A.P – Lopes, 2013) encontra-se preservado na porção sul da Bacia de Pelotas e na porção norte da PCRS. A Barreira III (aprox. 125 ka A.P) possui a mesma orientação da Barreira IV (7 ka A.P até o presente), apresentando continuidade quase que ao longo de toda a Bacia. Recentemente, Dillenburg *et al.* (2020) apresentaram dados que podem posicionar um novo sistema Laguna-Barreira (Barreira IIIa), formado entre 36,2 to 47,7 ka AP. Dessa forma, os sistemas Laguna-Barreira representam o registro de sequências deposicionais de alta frequência (Rosa *et al.*, 2017), as quais correspondem ao trato de sistemas de nível alto de uma sequência de menor frequência (Collischonn & Rosa, 2022).

3.2 Contexto Hidrogeológico da Região Costeira

Hausman (1995) foi o primeiro autor a publicar um mapa hidrogeológico do Estado denominado de Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul na escala 1:50.000. Essas províncias foram distribuídas levando em consideração à correlação existente entre a litologia e a geomorfologia. A planície costeira foi classificada como Província das Sedimentares Litorâneas, que ainda, segundo as condições de captação e de qualidade da água, foi dividida em sub províncias denominadas Oceânica, Lagunar Externa, Lagunar Interna (norte e sul), Itapuã e Guaíba.

Freitas *et al.* (2004), na divulgação dos resultados preliminares do mapa hidrogeológico do RS, agrupou as litologias de acordo com as semelhanças hidrogeológicas denominando os aquíferos intergranulares relacionados aos depósitos arenosos costeiro de Aquíferos Porosos Cenozóicos Costeiros.

Lisboa *et al.* (2004), ao analisar as características hidrogeológicas gerais dos materiais que compõem as camadas litológicas, forneceu suporte para a primeira classificação generalizada dos principais sistemas aquíferos. A região costeira passou a compor o Sistema Aquífero Cenozóico da Planície Costeira. Esse Sistema, segundo Lisboa *et al.* (2004), é o de maior potencial dentre os aquíferos que compõe os Sistemas Aquíferos Cenozóicos sendo formado por areias e arenitos fracamente cimentados dispostos em multicamadas de origens variadas que podem atingir satisfatórias extensões laterais e verticais e apresentam condições livres, semi confinadas a confinadas.

De acordo com o mapa elaborado por Machado & Freitas (2005) no litoral do RS o Sistema predominante é o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC) conforme ilustra a Figura 2.

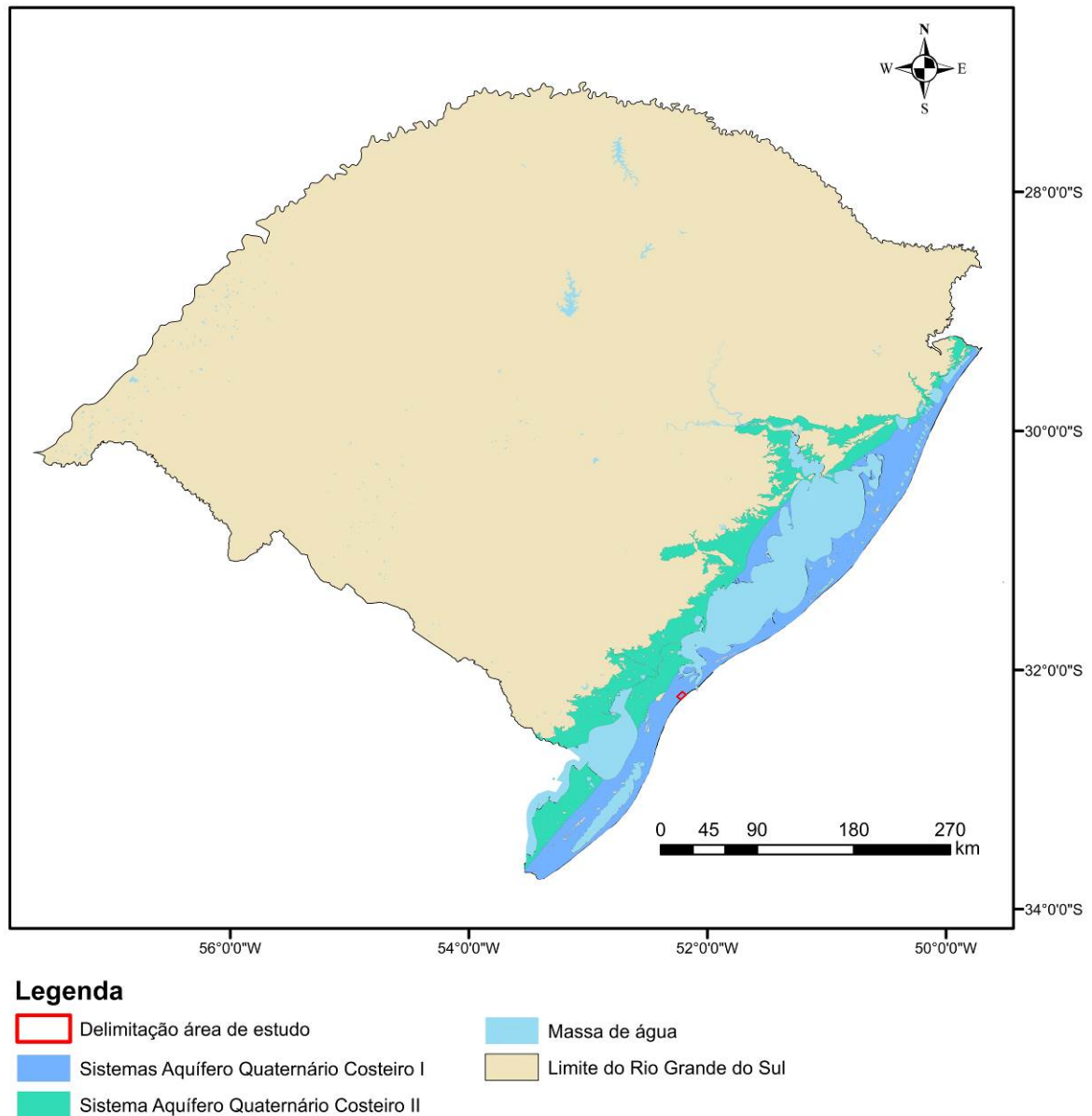


Figura 2. Planície costeira inserida dentro do contexto hidrogeológico e identificação da área de estudo (adaptado de Machado & Freitas, 2005).

Esse sistema é subdividido em: Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II. O primeiro Sistema é caracterizado por uma sucessão de camadas arenosas inconsolidadas de granulometria fina a média e de cor esbranquiçada que ocorrem intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas. As capacidades específicas geralmente são altas, ultrapassando 4 m³/h/m, pois esse sistema aquífero está associado a depósitos de sedimentos pouco consolidados. As salinidades são inferiores a 400 mg/l e eventualmente são

encontradas águas cloretadas com maior teor salino. Enquanto o segundo é composto por uma sucessão de areias finas inconsolidadas, esbranquiçadas e argila cinza. No topo, os primeiros metros são pelíticos, bastante cimentados. As capacidades específicas variam de baixas a médias, entre 0,5 e 1,5 m³/h/m e as águas são classificadas como bicarbonatadas a cloretadas sódicas. Os sólidos totais dissolvidos variam entre 600 e 2000 mg/l (Machado & Freitas, 2005).

Estudos recentes, realizados por Troian *et al.* (2020) na porção norte da PCRS, identificaram que o Sistema Aquífero Costeiro é formado por sedimentos cenozóicos e que os mesmos apresentam uma heterogeneidade estratigráfica. Nesse sistema os aquíferos são formados por camadas de sedimentos arenosos (areias grossas, médias, finas e muito finas) intercalados com camadas de sedimentos finos (silte e argila). Essas camadas ocorrem em diversas profundidades e foram formadas por diferentes ambientes de sedimentação. Em função disso o sistema passa a ser formado por unidades hidroestratigráficas, sendo que os autores identificaram a ocorrência de quatro unidades principais, onde cada uma das unidades apresenta características hidrogeológicas e hidroquímicas distintas. As unidades com predominância de sedimentos arenosos apresentaram valores mais altos de porosidade efetiva e valores mais baixos de salinidade ao contrário das unidades argilosas que apresentaram valores menores de porosidade efetiva e salinidade mais elevada.

3.3 Circulação da Água Subterrânea com Ênfase em Aquíferos Costeiros

A água subterrânea tem origem e papel fundamental no processo do ciclo hidrológico da Terra, pois ela é um dos componentes responsáveis pelo desenvolvimento desse circuito. Esse ciclo tem como função fazer com que a água circule na natureza através dos oceanos para a atmosfera, da atmosfera para os continentes, até chegar novamente aos oceanos. Da atmosfera para o continente a água chega à superfície da terra através de precipitações meteóricas no estado líquido ou sólido. A água na forma líquida é o mais importante meio de contribuição para a recarga dos aquíferos, por meio da infiltração, atingindo a zona saturada.

A água subterrânea pode mover-se através dos poros ou vazios originais da rocha ou ainda nas fissuras/cavidades geradas por dissolução após sua formação. Em aquíferos de sedimentos inconsolidados a porosidade primária é a que permite a circulação de água nesses reservatórios, mesmo que lentamente, até atingir áreas de

descargas, que podem ser rios, lagos, nascentes, banhados e oceanos. Quando localizada a pouca profundidade, a água subterrânea pode, ainda, ser absorvida pelas raízes das plantas.

Sabemos que o mar recebe praticamente todo o escoamento, seja superficial ou subsuperficial das águas continentais. É natural que as águas se movimentem para locais de topografia mais baixa, ou seja, para lugares com menores altitudes favorecendo assim o gradiente hidráulico.

Geralmente, os modelos de fluxos que estudam a relação do contato da água doce (aquíferos) com a água salgada (mar) admitem que exista uma interface separando esses dois fluidos por densidade em condições naturais, ou seja, sem a ocorrência de bombeamento, e, portanto, a direção de fluxo da água doce em direção ao mar ocorre acima dessa interface. No caso de ocorrência de bombeamento essa interface pode ser alterada, bem como pode ocorrer um avanço da intrusão salina, provocando a salinização dos aquíferos.

Um dos fatores que influenciam o fluxo da água subterrânea é a permeabilidade. Essa propriedade indica a facilidade com que a água flui através dos sedimentos e está relacionada com o tamanho e o volume de poros interconectados, a forma, a distribuição e a variação do tamanho dos grãos. Quanto mais homogêneo o tamanho e a distribuição dos grãos, maior é a interconexão entre poros e a capacidade do aquífero em transmitir água (Iritani & Ezaki, 2009).

Outro fator que pode influenciar nesse movimento está relacionado com a geometria das camadas de rochas e sedimentos que formam o aquífero, bem como as estruturas originadas através dos processos de deposição dessas camadas. Assim, tanto a geometria como a orientação dessas estruturas podem provocar alterações no fluxo da água subterrânea. Com base nisso podemos afirmar que o fluxo pode ocorrer para diferentes direções, alimentando não apenas os oceanos, mas rios, lagos, banhados entre outros.

Segundo Iritani & Ezaki (2009) o aquífero costeiro no Estado de São Paulo, apresenta direções de fluxo tanto para rios, como para o oceano.

Em um estudo realizado no litoral do Paraná (Souza *et al.*, 2012) foram identificados, em dois locais distantes poucos quilômetros um do outro, que as mesmas feições geológicas (planícies costeiras com cordões litorâneos) podem apresentar resultados hidrogeológicos distintos (qualidade de água subterrânea, fluxo subterrâneo e condutividade hidráulica). Em uma área a qualidade da água e o fluxo subterrâneo são influenciados pela maré, enquanto que na outra a maré tem pouca

ou quase nenhuma influência. A recarga desses locais é ocasionada principalmente pela precipitação pluviométrica. No caso das descargas foi observado que as mesmas ocorrem de diferentes formas, sendo a primeira influenciada pela exploração dos poços que são utilizados para abastecimento da população e, a segunda, ocorre em direção aos cursos de água existentes no local. Pereira (2007) e Pereira *et al.* (2003) desenvolveram um trabalho com o objetivo de avaliar o fluxo da água subterrânea nas lagoas que formam o sistema lacustre Bonfim (RN). Esse autor identificou, através de análises potenciométricas, que a água subterrânea em determinadas regiões, tem o fluxo direcionado para as lagoas (exemplo Lagoa do Bom Fim) e rios. Além disso, observou que há também fluxo proveniente dos corpos de água superficiais para os aquíferos. Esses autores também identificaram que os divisores hidrogeológicos são permanentes (quando os divisores topográficos são expressivos) ou transitórios (dependendo da topografia, da pluviometria e das taxas de infiltrações). Isso evidencia que em regiões costeiras há diferentes direções de fluxo da água subterrânea.

Existem também inúmeras lagoas que dependem diretamente das águas subterrâneas para sua formação. Ocorrem em locais onde não existe rede de drenagem superficial e conseqüentemente a recarga é realizada através do fluxo subterrâneo. Como por exemplo, as lagoas interdunares no município de Fortaleza (Lagoa do Papicu), Caucaia (lagoas da Banana e do Porco), São Gonçalo do Amarante (Lago das Cobras) entre outras (Morais, 2011).

Em um trabalho realizado na Lagoa Mangueira, litoral sul do Rio Grande do Sul, foi constatado que a mesma recebe contribuição de fluxos subterrâneos contribuindo para o aumento de nutrientes e outros elementos nas águas superficiais da Lagoa (Andrade *et al.*, 2012).

Em um estudo realizado com o intuito de contribuir de forma significativa para o processo de gestão dos recursos hídricos, no município de Barcarena/PA, foi mapeado o fluxo subterrâneo do aquífero superior (Sistema Barreiras). Foi gerado um mapa com levantamento de informações em poços e depois trabalhado em um *software* específico. Ao se analisar o mapa de fluxo foi observado que rios na mesma área de estudo podem ou não ser alimentados pelas águas subterrâneas. Por exemplo, o rio Barcarena recebe influência de águas subterrâneas, enquanto que o rio Murucupi não (Bandeira *et al.*, 2007).

Um trabalho desenvolvido por Menezes & Andrade (1984) avaliou a exploração da água subterrânea nas dunas da praia de Caponga (Ceará). Esses autores

identificaram que o fluxo da água ocorre, preferencialmente para o oceano, mas que também há fluxo para outras direções e corpos hídricos (exemplo Lagamar do Tijuco).

Esse tipo de estudo onde se procura identificar as direções do fluxo de água subterrâneo na sua grande maioria é realizado com base em dados de inventários de poços (nível estático, altura da boca do poço) e dados de altimetria. Como resultado as águas tendem a percolar de regiões onde há maior carga hidráulica para áreas de menor carga, sendo que para aquíferos livres há grande relação com a topografia. Contudo, além desses parâmetros citados acima, podem haver fatores secundários que interferem na direção de fluxo como, por exemplo, a estruturação, geometria e deposição das camadas dos pacotes em zonas costeiras. Esse pode ser um dos parâmetros que explica o porquê das diferentes direções que a água pode percorrer estando ela tão próxima de atingir a cota relativa do nível do mar.

3.4 Uso de Georadar em Avaliações Geológicas e Hidrogeológicas

A utilização do *Ground Penetrating Radar* (GPR) ou Georadar envolve diversas áreas, como investigações arqueológicas, engenharia, meio ambiente, dentre outros. O uso em estudos geológicos ganhou impulso a partir da metade da década de 90, acompanhado de um notável crescimento na área da sedimentologia (Neal, 2004).

O sucesso do Georadar na caracterização de depósitos inconsolidados é explicado pelo fato de se obter imagens em subsuperfície de alta resolução, tornando-se bastante eficaz na determinação da arquitetura estratigráfica e da geometria interna dos corpos sedimentares (Araújo, 2017).

O Georadar é uma técnica geofísica que detecta discontinuidades nas propriedades elétricas dos materiais presentes em subsuperfície a poucos metros de profundidade. Esse método baseia-se na geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de discretos pulsos de alta frequência na faixa de MHz de energia eletromagnética (Neal, 2004).

Conforme Davis & Annan (1989), a onda emitida se propaga em subsuperfície até que encontre um horizonte com contraste nas propriedades elétricas. Devido à variação no conteúdo de água, os contrastes gerados, geralmente, estão relacionados com os tipos de sedimentos, com a granulometria, com a porosidade e com a compactação (Jol & Bristow, 2003). Variações nessas propriedades em subsuperfície fazem com que parte da onda seja refletida e/ou refratada. A onda refletida é recebida

por uma antena receptora e a mesma é convertida em um sinal digital onde é gravada na memória de um coletor, gerando assim, uma imagem similar a uma tomografia.

Muitos resultados são apresentados em trabalhos realizados em regiões costeiras, mediante a utilização do Georadar na identificação de estruturas internas de dunas eólicas (Schenk *et al.*, 1993; Pestana & Botelho, 1997; Oliveira Jr. *et al.*, 2000; Pereira, 2001) em áreas costeiras ao longo da Bacia de Pelotas com objetivos de identificar o padrão de empilhamento estratigráfico dos sistemas deposicionais costeiros (Barboza *et al.*, 2009, 2011, 2013, 2014, 2018; Hein *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2014; Dillenburg *et al.*, 2014, 2017; Bitencourt *et al.*, 2016; Leal *et al.*, 2016; Rockett *et al.*, 2016; Rosa *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2016, 2017; Manzolli *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2018; Oliveira, 2019) reforçando a importância do método, principalmente em terrenos com alta resistividade, isto é, formados por sedimentos arenosos.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A área de estudo está situada na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, em uma área pertencente ao Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS. (Fig. 3).

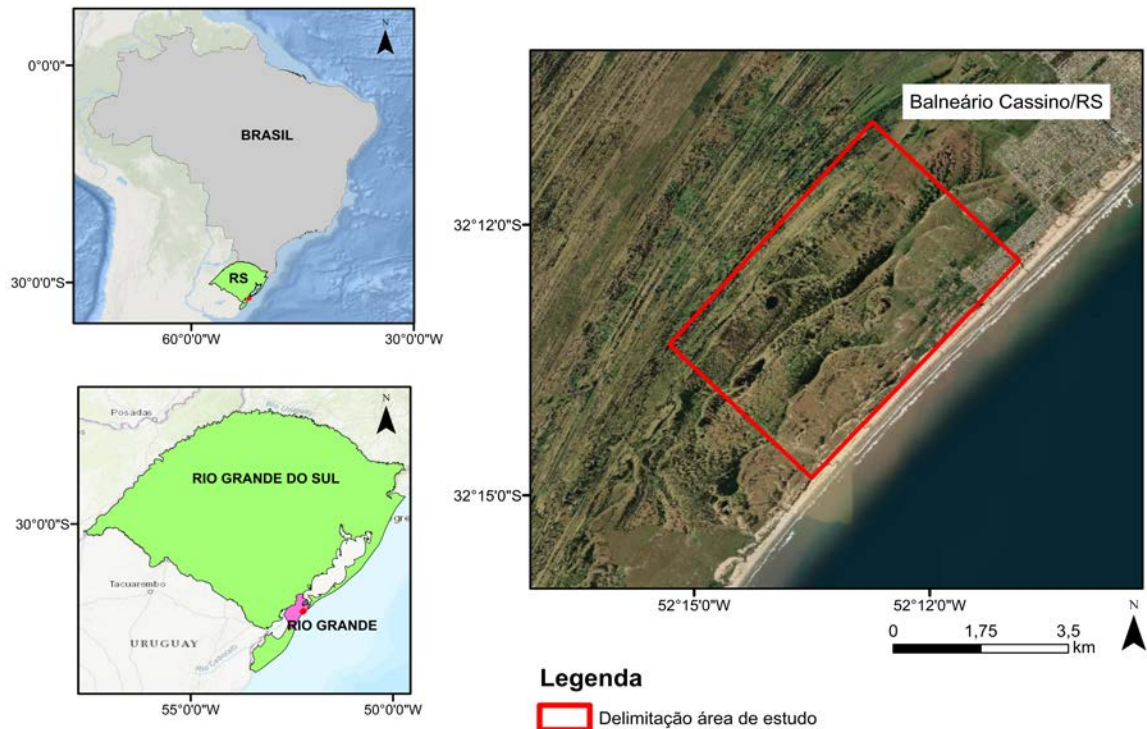


Figura 3. Mapa de localização da área de estudo situada no Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

4.2 Clima, ventos, ondas e marés.

A localização geográfica da PCRS a inclui dentro da Zona Subtropical Sul sob o controle básico de massas de ar marítimas, de origem tropical e polar (Hasenack & Ferraro, 1989).

O clima para a área de estudo é classificado com Subtropical Ia - Pouco úmido com inverno frio e verão fresco (Rossato, 2020). A taxa de precipitação média varia entre 1200 e 1500 mm anuais, distribuídos entre 80 e 100 dias de chuva. A temperatura média anual varia entre 17 e 20°C. A temperatura média do mês mais frio

oscila entre 11° e 14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 20° e 26°C.

A temperatura do ar, precipitação e o vento são influenciados por dois centros de alta pressão: o Anticiclone Semi-permanente do Atlântico Sul (Anticiclone de Santa Helena) e o Anticiclone Móvel Polar (Nimer, 1977). A forçante desses dois centros controla o regime de ventos, um dos agentes mais importantes na contribuição da morfologia da planície costeira. O regime de ventos de alta energia é de natureza bimodal. O vento dominante, proveniente do Anticiclone do Atlântico Sul, incide de nordeste sendo predominante nos meses de primavera e verão. Já o vento associado à atividade do Anticiclone Móvel Polar incide de W-SW e ocorre de forma secundária, sendo predominante nos meses de outono e inverno (Tomazelli, 1993).

A circulação atmosférica é eventualmente afetada por eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS). Estes eventos afetam o regime de ondas e as correntes litorâneas na costa do Rio Grande do Sul (RS).

A costa do RS é caracterizada, principalmente, pela ocorrência de ondulações do tipo “*swell wave*” geradas pelos ventos provenientes do quadrante SE e por vagas locais “*sea wave*” resultantes dos ventos soprando a superfície do mar de NE e E. Nas passagens de frentes frias, provenientes do Sul, podem ocorrer a geração de ondas de tempestade “*storm wave*” (Motta, 1967; Tomazelli & Villwock, 1992; Tomazelli & Villwock, 2000). Durante as tempestades (estações de outono e inverno) as ondas podem chegar a alturas superiores a 2 m e sobre-elevar o nível do mar em até 1,30 m (Barletta & Calliari, 2001; Calliari *et al.*, 1998).

Devido às variações na orientação da linha de costa (azimute varia de 10° a 60°) e na inclinação da plataforma continental (0,027° a 0,125°) as praias do RS estão submetidas a gradientes de energia de onda (Dillenburg *et al.*, 2000; Martinho *et al.*, 2009).

A maré é do tipo micromaré em um regime semidiurno onde a variação média da maré é de apenas 0,30 m (Barletta & Calliari, 2001; Calliari *et al.*, 1998). Como consequência, o transporte de sedimentos costeiros é dominado pela ação das ondas.

4.3 Geologia e Geomorfologia

A área de estudo está situada no Sistema Depositional Laguna-Barreira IV. A Barreira IV, conforme Dillenburg & Barboza (2014), está inserida no setor costeiro compreendido entre o Albardão e o Estreito, correspondendo à parte norte de uma

reentrância costeira com grande cobertura eólica caracterizada por condições deposicionais que resultam em uma linha de costa regressiva em longo prazo (Dillenburg *et al.*, 2000). A natureza regressiva da barreira costeira desse setor é representada pela ampla planície de cordões de paleodunas frontais (até 15 km) que é bem desenvolvida entre o Farol de Sarita e Rio Grande e pela estratigrafia holocênica, que consiste em areias e lamas da plataforma continental recobertas por unidades da *shoreface*, *foreshore* e depósitos eólicos. Essa planície foi formada durante os últimos 7 a 6 ka, com o nível do mar em torno de 2 m acima do atual até 3 ka AP, quando então entrou em queda até o nível atual (Barboza & Tomazelli, 2003; Barboza *et al.*, 2021). A resultante da evolução costeira aqui é, portanto, naturalmente regressiva, mas também exibe um componente antropogênico em sua evolução muito recente (Dillenburg & Barboza, 2014).

As areias praias são de composição quartzosa de granulometria predominantemente fina (Martins, 1967) e cascalhos bioclásticos em uma faixa que ocorre entre Rio Grande e o Chuí (Calliari & Klein, 1993). O campo de dunas, representando os depósitos de areias eólicas de granulometria fina a muito fina (Martins, 1967) são bem desenvolvidos, mostram largura variável e praticamente estendem-se ao longo de toda a linha de costa (Villwock & Tomazelli, 1995).

A Barreira IV, na região do Cassino, apresenta um arcabouço estratigráfico que permite classificá-la como progradante (regressiva), ou seja, seu crescimento ocorre no sentido do oceano (Dillenburg *et al.*, 2017). A sucessão vertical de fácies apresenta depósitos marinhos (*offshore*) na base, sucedidos por depósitos de antepraia (*shoreface*), pós-praia e estirâncio (*foreshore*) e uma pequena cobertura eólica no topo (Clerot *et al.*, 2003a).

As fácies, praias e eólicas, apresentam-se desenvolvidas sob as formas de cordões litorâneos (Godolphim, 1976) e lençóis de areia (Dillenburg *et al.*, 2017), respectivamente. Essas duas fácies são difíceis de serem distinguidas apenas por análise litológica. Comumente, elas são individualizadas com base no grau de compactação dos sedimentos, obtidos durante a realização de sondagens e em conjunto com uma análise granulométrica de detalhe, além de identificação através de fotografias aéreas e de imagens de satélites.

Os resultados das análises granulométricas, de uma maneira geral, revelam propriedades texturais muito semelhantes para os depósitos arenosos praias e eólicos. Na análise dos parâmetros estatísticos, todavia, observa-se uma diferença sistemática entre areias praias que mostram uma seleção moderada e areias eólicas

que apresentam uma seleção boa. Esta diferenciação, ainda que sutil, mas bem evidente, é corroborada por uma acentuada diferença nos graus de compactação entre as litologias destes dois tipos de depósitos (Clerot *et al.*, 2003b).

Nas fotografias aéreas e nas imagens de satélite, morfologicamente, observam-se padrões distintos caracterizados pela alternância de cristas com grande amplitude ao longo da porção interior, truncadas por fases de lençóis de areias. Junto à região costeira proximal são identificadas somente fases de lençóis de areias (Fig. 4) na superfície do terreno (Dillenburg *et al.*, 2017).

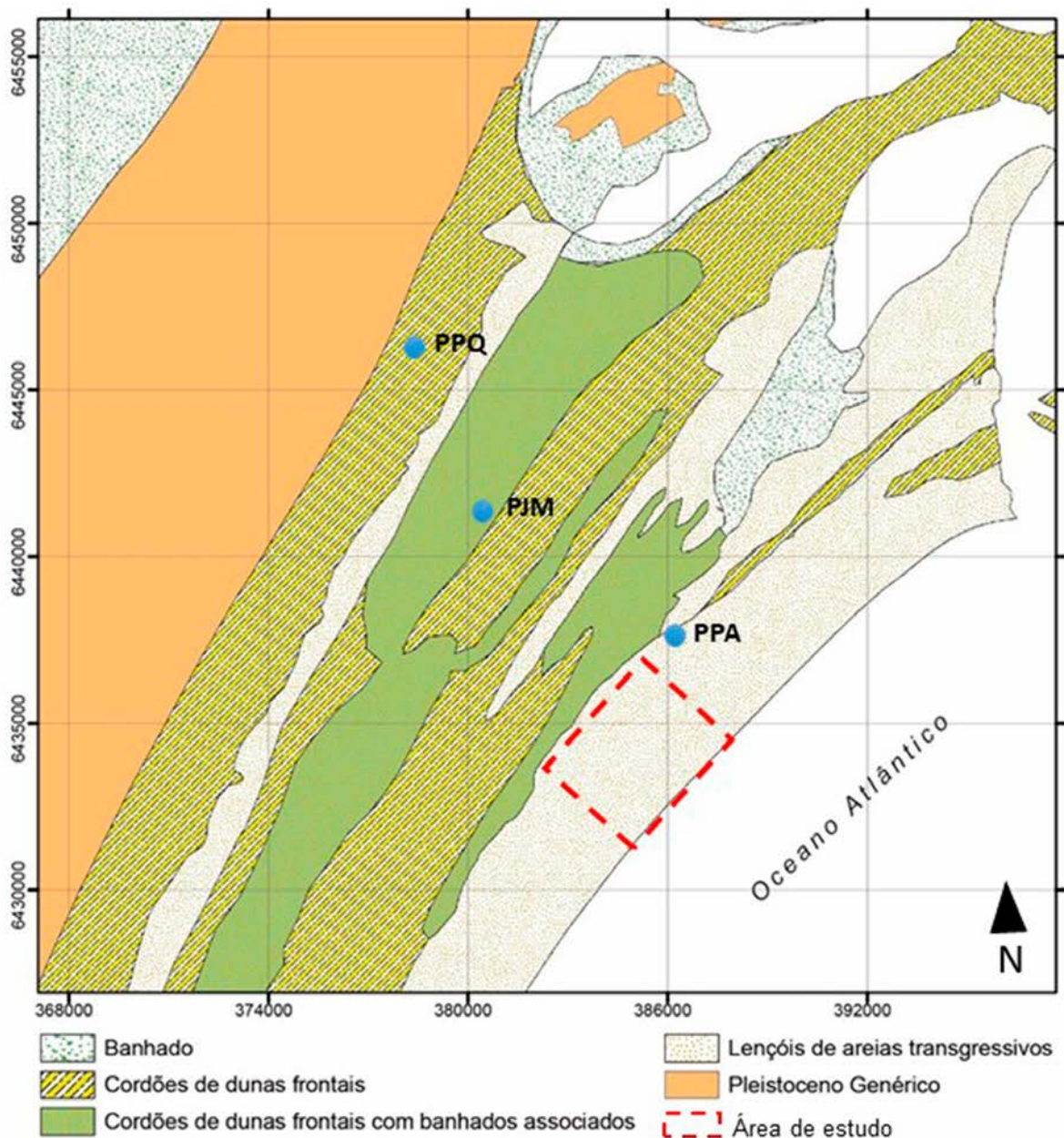


Figura 4. Mapa geomorfológico do embaiamento Rio Grande/Cassino-RS. Detalhe para a área de estudo e dos poços de monitoramento construídos para o trabalho de Nascimento (2013) (adaptado de Dillenburg *et al.*, 2017).

O mapa geológico de Villwock *et al.* (1994) apresenta a área de estudo como formada por depósitos marinhos, praias e eólicos, relacionados à Barreira IV. Entretanto estes depósitos não são cartograficamente distinguidos. O mapa da CPRM (2008) apresenta a área de estudo como formada por depósitos praias (Q4p), constituídos de areia quartzosa fina, bem selecionada e apresentando laminação plano-paralela e cruzada; e por depósitos eólicos (Q4e) constituídos por areia quartzosa fina à média, bem arredondada e selecionada, com rara laminação plano-paralela e cruzada.

Em estudos realizados por Dillenburg *et al.* (2017) foi obtido um avanço no grau de detalhamento no conhecimento geológico superficial e da geomorfologia na área de estudo. Esta é dominada por depósitos eólicos, na forma de lençóis de areias transgressivos. Esses depósitos são formados por areias quartzosas finas, bem selecionadas e arredondadas, e apresentam raras laminações plano-paralelas e cruzadas.

4.4 Hidrogeologia

Nascimento (2013), realizou um estudo com o objetivo de caracterizar a unidade aquífera Barreira Holocênica na região do Balneário Cassino, Rio Grande (RS). A localização dos poços de monitoramento construídos para esse estudo está ilustrada na figura 4.

A partir dessa pesquisa foi possível concluir que essa unidade, de espessura aproximada de 20 m, é constituída por três principais camadas (Fig. 5) e cada uma delas é resultado de diferentes tipos de ambientes de sedimentação.

No topo desse aquífero encontra-se uma camada que constitui o ambiente eólico que é composto por areias de granulometria média a fina, boa seleção, baixa compactidade, alta porosidade e baixa salinidade. A camada seguinte foi classificada com ambiente pós praia/estirâncio e antepraia, sendo constituída por areias de granulometria que variam de média a muito fina, má seleção e variado grau de compactação. Há ocorrências de argila em algumas porções da camada. Sua porosidade aparece de forma reduzida e o teor salino começa a aparecer de forma acentuada. E por último o ambiente de plataforma continental utilizado como base para delimitação da unidade aquífera. Essa camada foi diferenciada das demais por conter sedimentos argilosos de alto grau de compactação, baixa porosidade e elevado teor salino.

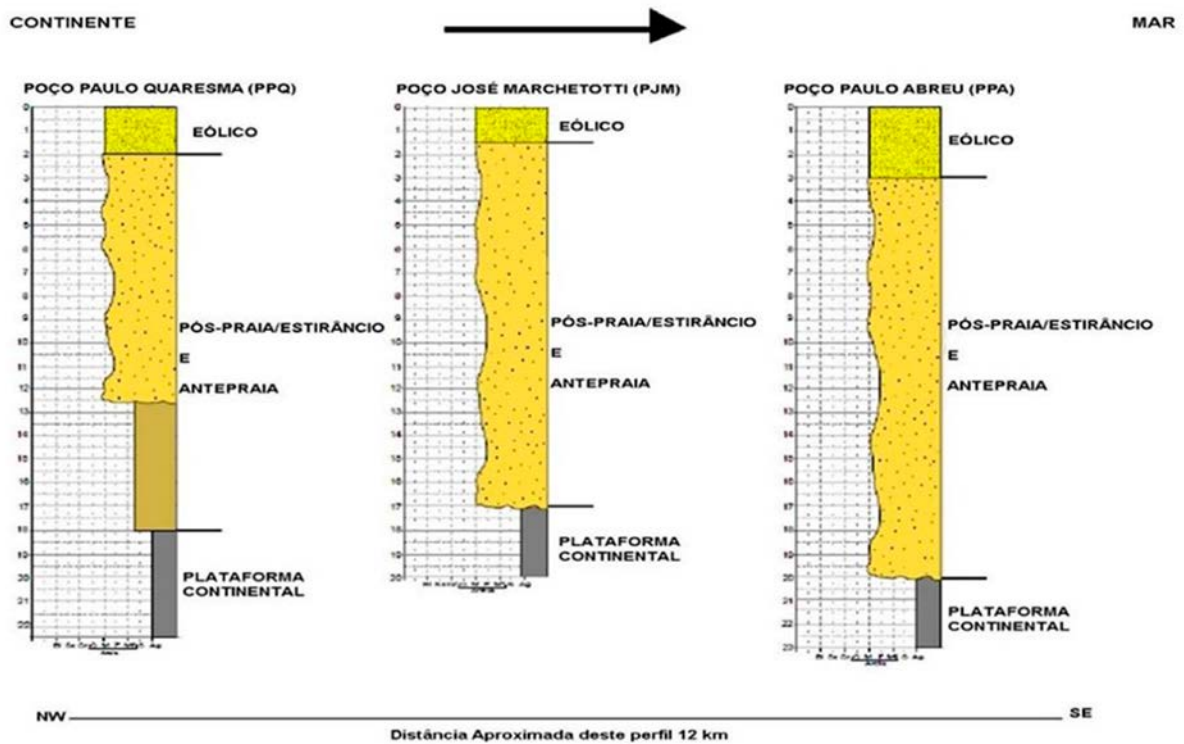


Figura 5. Perfis obtidos com base em poços de monitoramento da unidade aquífera Barreira Holocênica com a identificação das litologias que compõe cada camada e seu respectivo ambiente (Nascimento, 2013).

Segundo Nascimento (2013), nessa área, o aquífero é definido como livre, mas em alguns locais apresenta um comportamento de semi-confinado devido ao surgimento de lentes de argila. Desse modo, foi classificado como um aquífero heterogêneo e o fluxo identificado ocorre no sentido continente - oceano.

Em relação às análises físico-químicas realizadas a partir da coleta de águas subterrâneas, foi possível classificar a água, através do diagrama de piper, em dois grupos: bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e bicarbonatadas sódicas. No primeiro grupo, ao analisar a abundância dos cátions, uma das amostras apresenta característica $Ca > Na > Mg$ (cálcica) e a outra $Ca = Na > Mg$ (mista), enquanto que para o segundo grupo, o cátion predominante é o sódio classificando-a como água sódica $Na < Ca < Mg$ (Nascimento, 2013). Embora esses resultados tenham servido apenas como uma análise preliminar na área de estudo, eles estão de acordo com trabalhos realizados por Machado & Feitas (2005) e Reginato *et al.* (2009) na região costeira do RS.

5 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Para cada etapa foram agrupadas e definidas as seguintes atividades (Fig. 6).

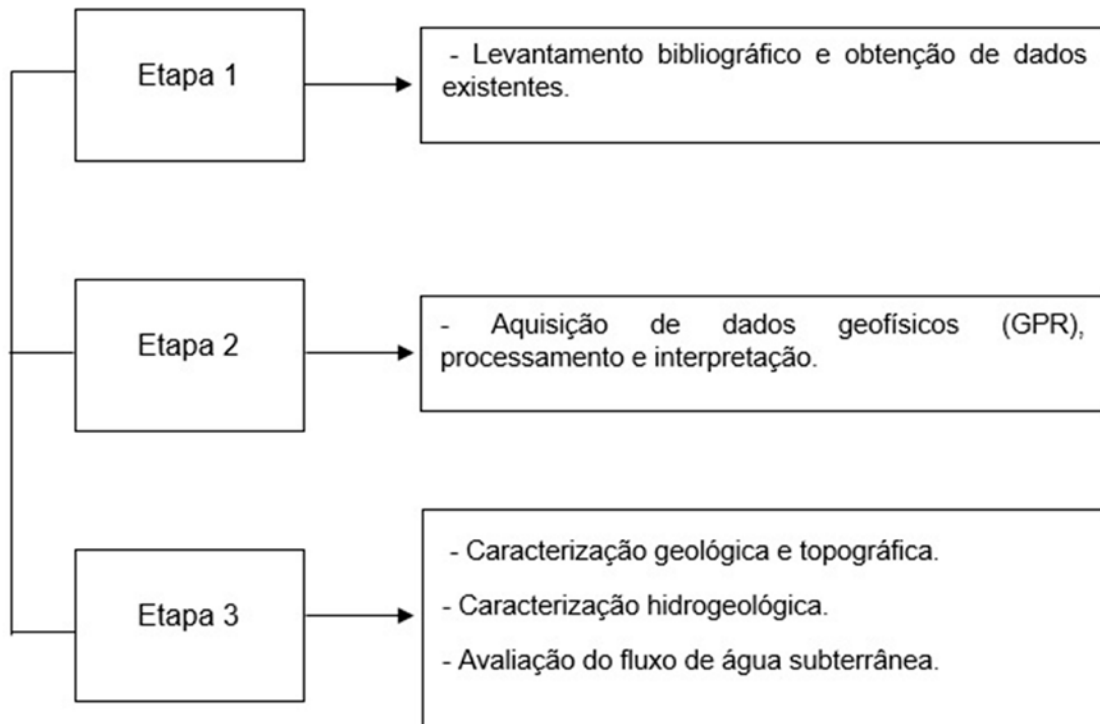


Figura 6. Fluxograma com a metodologia aplicada nesse estudo.

5.1 Revisão bibliográfica e obtenção de dados existentes.

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica sobre o fluxo de água subterrânea e estudos realizados para a região. Além disso, foi feito um inventário e cadastramento dos poços de monitoramento existentes na área de pesquisa. Esses dados foram cedidos pela empresa que elaborou os estudos para o licenciamento do parque eólico e as informações levantadas foram as seguintes: dados construtivos dos poços, perfis litológicos e dados de monitoramento dos níveis d'água realizados durante 11 meses consecutivos. Também foram obtidos perfis geológicos de sondagens (SPT) executadas na área. A localização dos poços de monitoramento e das sondagens são apresentadas na Figura 7.

A aquisição dessas informações foi de grande relevância para realizar a caracterização geológica e hidrogeológica dos depósitos sedimentares, bem como a

elaboração de mapas topográfico e potenciométricos da área. Esses dados também serviram de apoio para analisar, discutir e planejar os locais e orientações das seções onde foram feitos os levantamentos com georadar (GPR).

Ainda nessa primeira etapa foi realizado um levantamento dos índices pluviométricos para os meses de monitoramento dos níveis de água dos piezômetros. Esses dados foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o município de Rio Grande e auxiliaram na interpretação dos resultados.

5.2 Aquisição de dados geofísicos (GPR), processamento e interpretação.

Esta etapa teve como intuito a coleta de dados em subsuperfície para reconhecimento do padrão de empilhamento das camadas e caracterização dos depósitos sedimentares. Para isso foi utilizado o método geofísico do georadar (GPR).

O equipamento utilizado na aquisição dos dados é um modelo SIR-3000 da empresa GSSI™ (Geophysical Survey Systems, Inc.) acompanhado de antenas aéreas em um arranjo bi estático, operando com levantamentos com antenas de frequências centrais de 124 MHz, ambas fabricadas pela Radarteam Sweden AB. O método de levantamento utilizado de acordo com o arranjo das antenas foi o modo Common Off Set que consiste em duas antenas (uma transmissora e outra receptora) posicionadas a uma distância de 1 m, que se deslocam simultaneamente. O conjunto de antenas foi acoplado a um veículo que as transportou orientadas perpendicularmente ao sentido de deslocamento, com velocidade média de 20 km/h. Durante a aquisição o Sistema GPR foi conectado a um receptor GNSS no modo cinemático, gerando um arquivo de posicionamento espacial, permitindo a obtenção de informações para o georreferenciamento das seções através do método do posicionamento diferencial. Os dados de posicionamento foram coletados com um Sistema Trimble® PROXRT com a constelação GLONASS (datum: WGS84) e posteriormente, analisados e processados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os parâmetros utilizados na aquisição dos perfis de GPR seguiram os propostos por Barboza *et al.* (2014).

Os dados foram pós-processados através dos *softwares* Radan™ (GSSI – Geophysical Survey Systems, Inc.), Reflex-Win® (Sandmeier Geophysical Research) e Prism2® (Radar Systems, Inc.). Foram aplicados filtros de ganho e de frequência de sinal para eliminação de ruídos e correção da saturação, (*background removal* e *band-pass frequency ormsby*). A constante dielétrica de 10 foi utilizada, referente a areia

úmida na conversão do tempo de deslocamento da onda em profundidade, representada pela velocidade de 0,09 m/ns (Daniels *et al.*, 1995). Esta constante dielétrica foi validada utilizando-se dados litológicos obtidos a partir de furos de sondagem realizados em outros setores da barreira holocênica na Bacia de Pelotas (Dillenburg *et al.*, 2011).

Após esses ajustes as seções foram processadas novamente no *software* Radan™ e realizadas as correções da topografia com os dados obtidos pelo método de DGNSS. As interpretações desses dados foram feitas com base nos princípios da sismoestratigrafia (Mitchum Jr. *et al.*, 1977; Vail *et al.*, 1977) adaptado para o GPR por Neal (2004). Foram interpretadas as terminações dos refletores nos limites superiores e inferiores de cada unidade analisando também a geometria externa e configuração interna de cada radarfácies. Para validar a interpretação dos ambientes deposicionais foi aplicada a análise do traço (Leandro *et al.*, 2019).

5.3 Caracterização geológica e topográfica

A caracterização geológica do aquífero associado aos depósitos eólicos foi realizada com base nas informações coletadas a partir dos sedimentos amostrados em 32 sondagens do tipo SPT e 16 poços de monitoramento (piezômetros) localizados na área objeto dessa pesquisa.

As sondagens foram perfuradas até os 30 m de profundidade e realizadas de acordo com as especificações da NBR 6484/2001 da ABNT. Os furos foram executados por percussão, com auxílio de circulação de água e protegidas por um revestimento de 76,2 mm de diâmetro nominal externo. A coleta das amostras foi realizada através da cravação do amostrador padrão de 34,9 mm e 50,8 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente.

O grau de compactação foi obtido através do número de golpes necessários para que o martelo de 65 kg, que cai de uma altura de 75 cm de altura, cravasse os primeiros e os últimos 30 cm do amostrador padrão no solo determinando assim o índice de resistência à penetração do solo (NSPT).

Com esse material foi possível identificar as seguintes informações: NSPT; nível d'água, cotas em relação ao nível de referência escolhido, profundidade das camadas de sedimentos em relação à superfície do terreno e a classificação dos materiais, de acordo com a nomenclatura da NBR 6484/2001.

Tanto para a caracterização geológica como topográfica foi utilizado também os resultados obtidos através do levantamento de uma seção de Georadar.

O mapa topográfico para a área foi gerado com auxílio do *software* SURFER através da inserção de um banco de dados com as altitudes obtidas através do processamento de um perfil de GPR e das altitudes dos piezômetros cedidos pela empresa proprietária. As altitudes inseridas nesse banco de dados foram niveladas pelo método de GPS diferencial (DGPS).

5.4 Caracterização hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica do aquífero associado ao pacote de sedimentos eólicos foi realizada com base na interpretação dos dados dos poços de monitoramento e das sondagens existentes na área de estudo.

Para analisar as variações do nível estático foram utilizados os dados de 16 poços de monitoramento. Os poços são de propriedade de uma empresa localizada na área, sendo que todos os poços têm profundidade máxima de 3 m, portanto todos monitoram o aquífero que está associado apenas ao pacote de sedimentos eólicos. O monitoramento dos níveis estáticos dos poços foi realizado durante 11 meses consecutivos pela empresa, sendo que os dados foram cedidos para a elaboração desse estudo.

Todos os poços foram nivelados com uso de GPS Diferencial (DGPS) pela empresa proprietária. A referência de nível utilizada para calibração do equipamento e determinação do referencial altimétrico de superfície dos poços foi a RN/IBGE SAT-91715, localizada no Pier da Estação Naval de Rio Grande (RS). Os dados de altitude da boca dos poços e os de nível estático foram utilizados no cálculo das cargas hidráulicas. Com os dados de carga hidráulica foram gerados mapas potenciométricos e de fluxo da água subterrânea. Esses mapas foram gerados com o emprego do *software* SURFER.

5.5 Avaliação do fluxo e circulação da água subterrânea.

A partir da confecção dos mapas potenciométricos tornaram-se conhecidos os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea. Sendo assim, a unidade relacionada aos depósitos eólicos passou a ser analisada com maior detalhe a fim de avaliar e identificar as condicionantes responsáveis pelas direções de fluxo. Essa

avaliação foi realizada com a integração dos dados geológicos (perfis litológicos das sondagens e dos poços de monitoramento), perfil geofísico de GPR (padrão de empilhamento das camadas), topográficos (altimetrias do terreno obtidas com GPR e nivelamento dos poços), hidrogeológicos (níveis d'água e cargas hidráulicas) e climáticos (precipitação pluviométrica).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização geológica e morfológica dos depósitos eólicos.

A caracterização geológica e geomorfológica da área de estudo foi realizada a partir da compilação de informações obtidas através das sondagens, dos poços de monitoramento e da interpretação de uma seção de GPR. A Figura 7 sintetiza a localização de todos os levantamentos realizados.

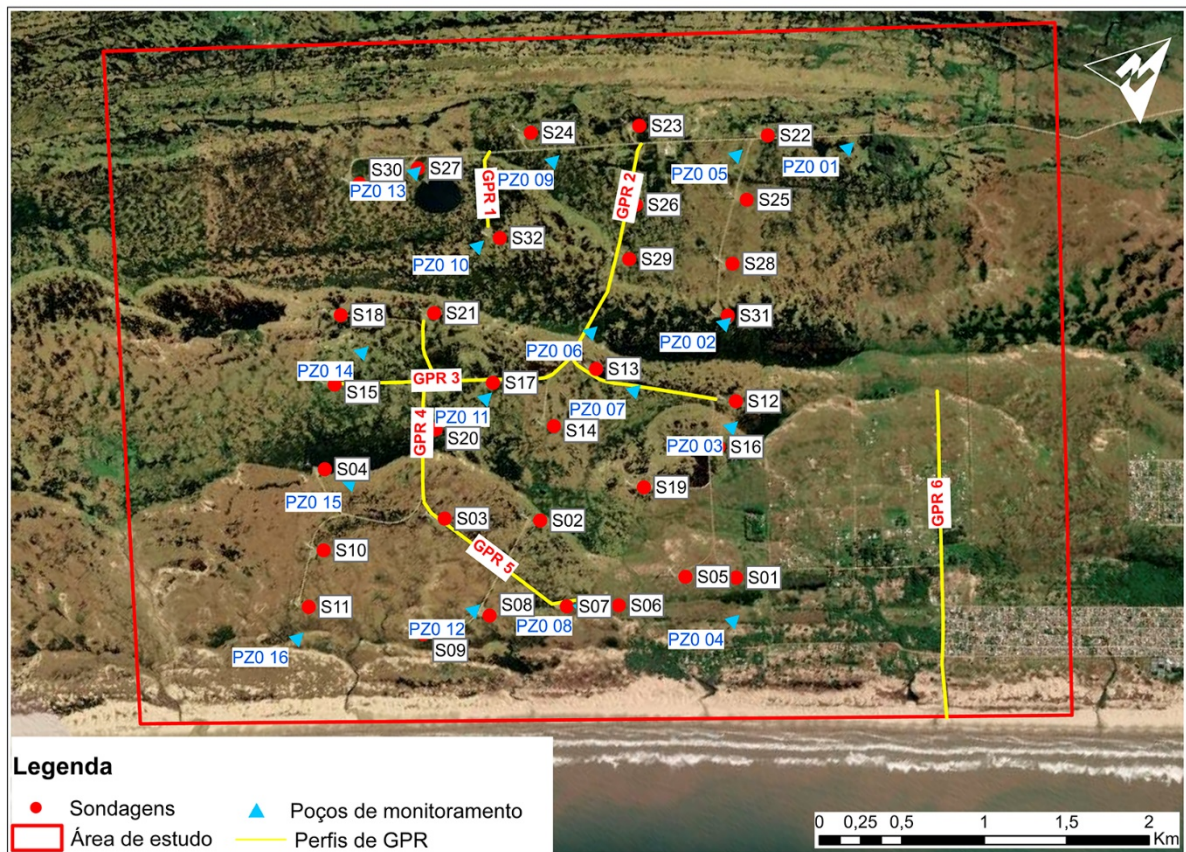


Figura 7. Localização das sondagens, poços de monitoramento e perfis de GPR executados na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

O depósito eólico (lençóis de areias transgressivos) na área é composto por areias quartzosas de granulometria muito fina, fina e média, bem selecionadas e de diferentes colorações (amarela, branca, cinza e cinza esverdeada). A compacidade dessa unidade variou de pouca a medianamente compacta.

De acordo com Clerot (2004) e Dillenburg *et al.* (2017) a principal característica observada na transição dos depósitos eólicos para os praias está na mudança do grau de compactação dos sedimentos, já que as características texturais dos sedimentos, em ambos os depósitos, são muito parecidas.

Embora o foco desse trabalho seja a unidade eólica, a profundidade do intervalo analisado foi de 7 m para que fosse possível também observar e delimitar o contato entre a unidade eólica e a praial conforme descrito por Dillenburg *et al.* (2017).

De fato, a mudança descrita pelos autores foi observada nas variações do grau de compactação. O contato entre os depósitos eólicos e os praias se deu próximo aos 3 a 4 metros de profundidade onde a compactidade altera-se de medianamente compacta para compacta e coincide com as interpretações feitas através da seção de GPR (terminação dos refletores).

Na Figura 8 é apresentado um croqui com a localização de todas as sondagens, bem como as que foram utilizadas na construção da seção geológica e que são representativas para a área, enquanto a Figura 9 ilustra a seção geológica com direção sul/norte, contemplando a correlação litológica entre as seguintes sondagens: S11, S10, S20, S17, S29 e S22.

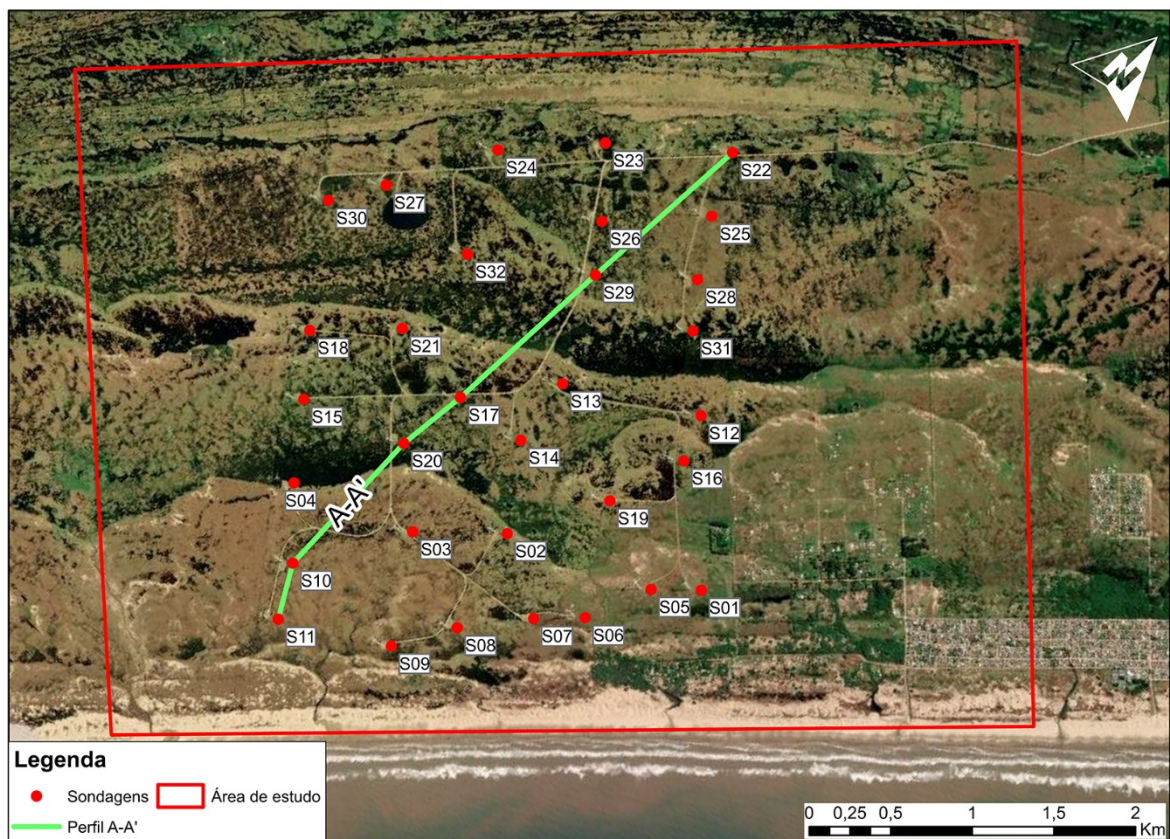


Figura 8. Croqui com localização das sondagens utilizadas na seção geológica da área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

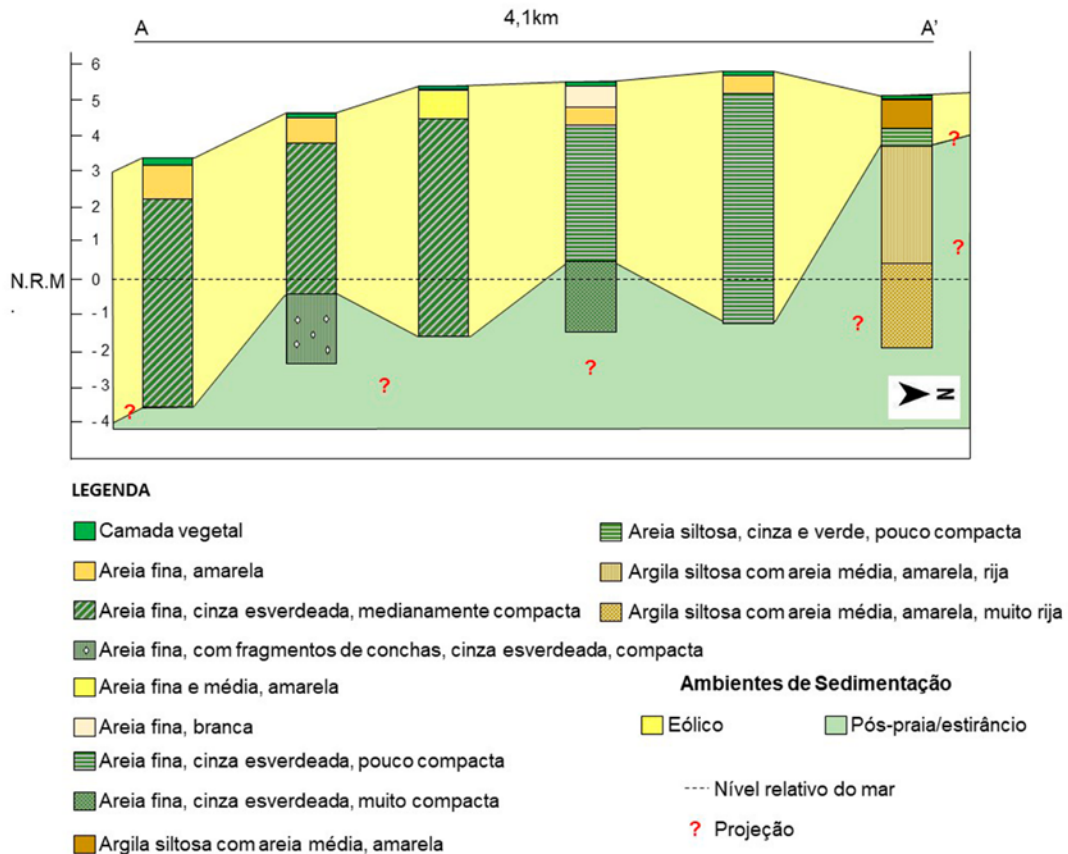


Figura 9. Seção geológica mostrando a variação textural dos sedimentos e o grau de compactação para o intervalo analisado.

A partir dessa correlação litoestratigráfica é possível avaliar as diferenças entre as camadas de sedimentos (granulometria e compactação), bem como sua continuidade lateral. A seção escolhida evidencia a variação textural dos sedimentos e os diferentes níveis de compactação encontrados até a profundidade do intervalo analisado (7 metros).

O reconhecimento do padrão de empilhamento das camadas, as espessuras e a interpretação dos ambientes de sedimentação foram definidos através de um perfil geofísico de GPR. Para esse trabalho foram adquiridas seis linhas de GPR (GPR 1,2,3,4,5 e 6) e selecionada apenas uma (GPR 6) levando em consideração a mais representativa para a estratigrafia da área.

Para essa interpretação também foi construída uma seção geológica, através das sondagens S01 e S16, a fim de correlacionar lateralmente os perfis litológicos obtidos através das sondagens com o registro da seção de georadar. A figura 10A mostra a localização do registro completo e a delimitação da linha processada/interpretada, enquanto a figura 10B ilustra a seção geológica construída para a correlação lateral entre as duas metodologias.

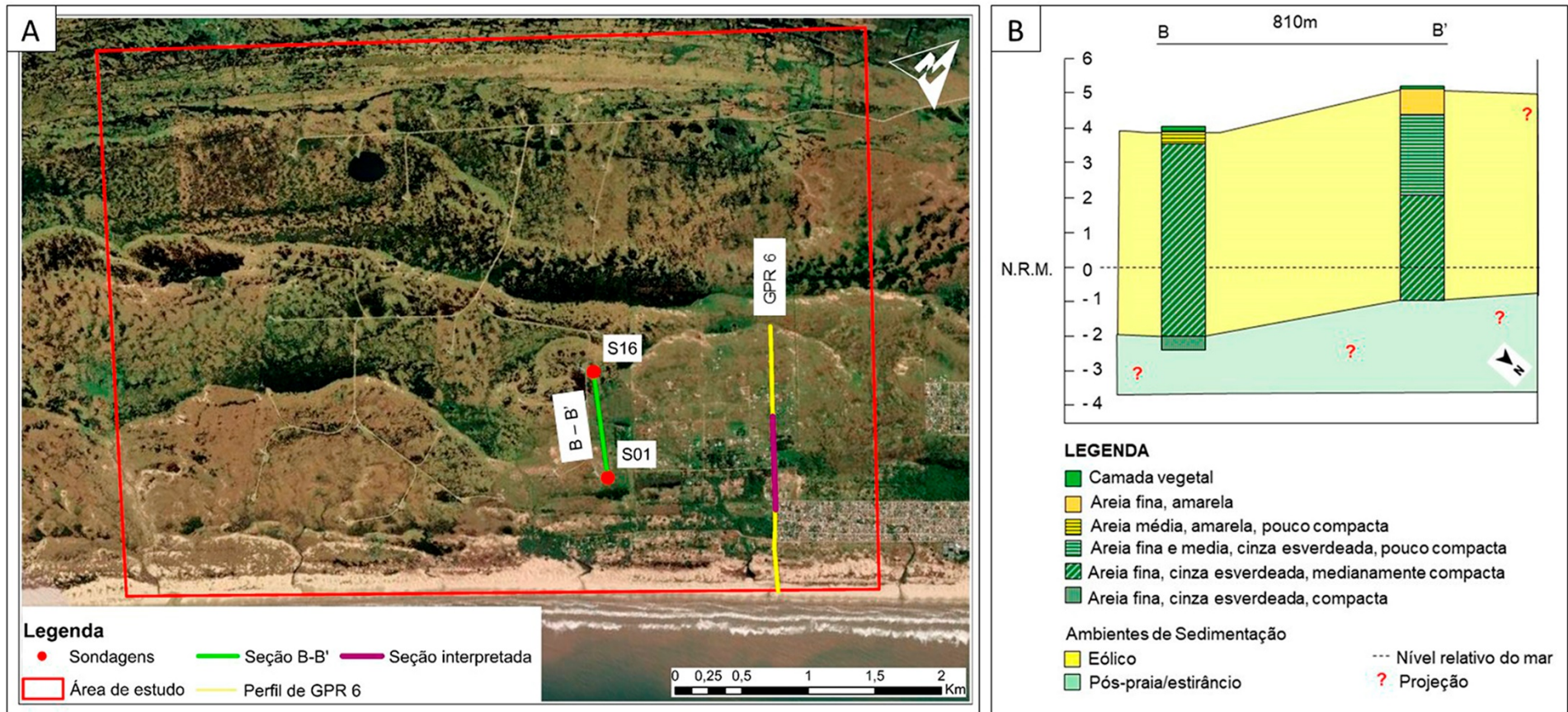


Figura 10. Localização das seções de georadar e geológica. A) Localização das sondagens utilizadas na seção e do perfil geofísico completo vs. perfil processado/interpretado (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022); B) Seção geológica utilizada na correlação lateral com o perfil de GPR (elaborado pela autora).

Na Figura 11A é apresentado o registro geofísico processado. Já na Figura 11B foram delimitadas cada fácies levando em consideração as terminações de refletores, a geometria e o padrão interno das reflexões. Por fim, a interpretação de cada ambiente é apresentada na Figura 11C.

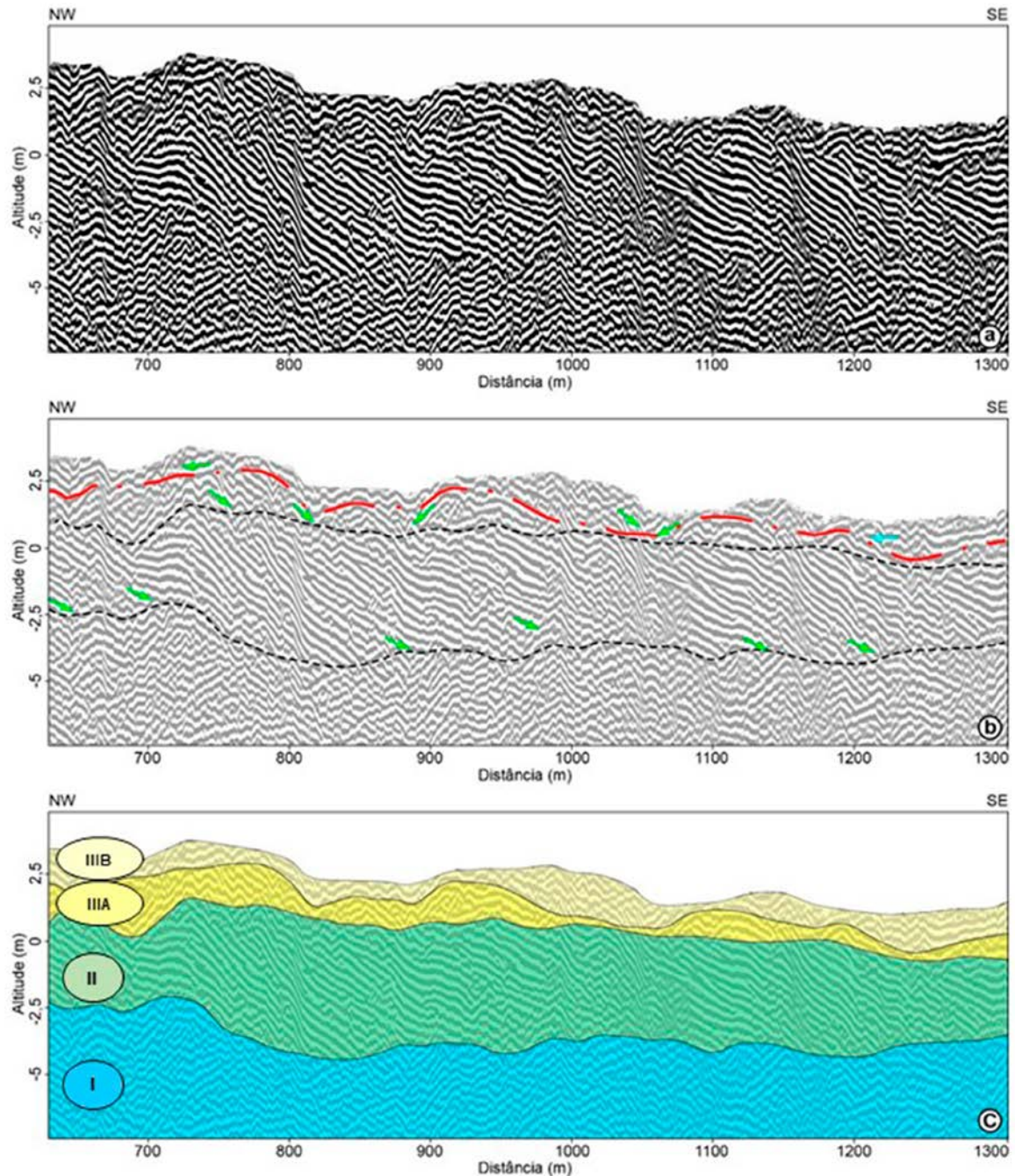


Figura 11. Detalhe da seção de georadar. A) Registro de GPR processado (elaborado pela autora); B) Identificação das terminações dos refletores e delimitação das superfícies (elaborado pela autora); C) Interpretação dos ambientes: I – Antepraia Superior; II Pós-praia/estirâncio; IIIA/IIIB Unidade eólica.

A Figura 11 mostra um perfil de GPR com 700 m de comprimento, partindo do continente (NW) em direção ao oceano (SE). Foram interpretados da base para o topo

3 ambientes: I – Antepraia Superior; II - Pós-praia/estirâncio e a Unidade eólica representada pelas IIIA – Dunas frontais e IIIB - Lençóis de Areias Transgressivos.

A Antepraia Superior foi caracterizada por refletores ondulados, descontínuos e com um padrão caótico (ambiente de alta energia).

O Pós-praia/estirâncio apresenta refletores contínuos, subparalelos com refletores mergulhando em direção ao oceano. A terminação dos refletores no limite inferior ocorre em downlap e o limite superior apresenta terminações em toplap.

E por fim a unidade eólica constituída por dunas frontais e lençóis de areias, onde as dunas demonstram refletores ondulados, descontínuos e com terminações de alto ângulo com mergulho ora para o mar, ora para o continente e os lençóis, no topo, formados por refletores horizontais e sub-paralelos.

No mapa altimétrico da área de estudo (Fig. 12) é possível observar a topografia relativamente plana da região, com amplitude altimétrica de 3.2 m.

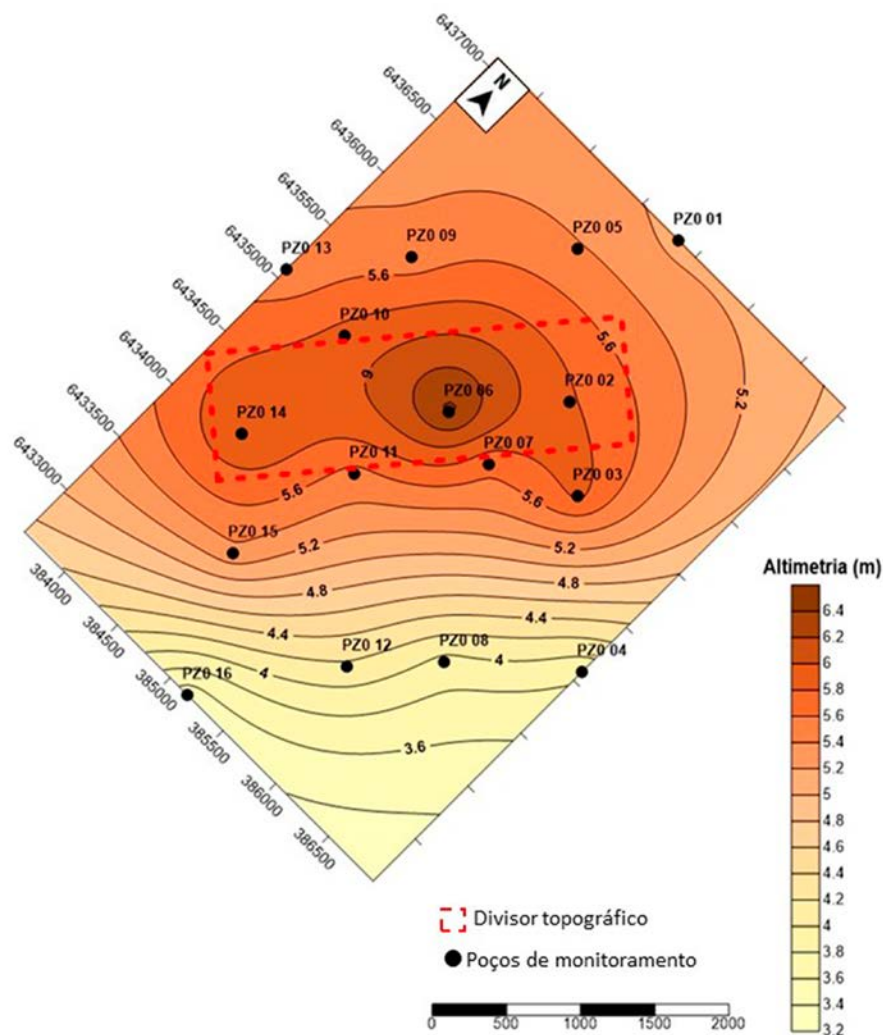


Figura 12. Mapa topográfico obtido através do software SURFER com base na integração dos dados das altitudes dos poços e das seções de GPR.

A maior altitude na área é observada entre dois pontos que estão localizados na porção central da área, alinhados na orientação de NE para SW. Este alinhamento forma um divisor topográfico sinalizado pelo retângulo em vermelho ilustrado na figura 12. Esse alto topográfico é uma condicionante geomorfológica que influencia diretamente nos sentidos de fluxo das águas do lençol freático e é melhor observada a partir da confecção dos mapas de fluxo apresentados no tópico 6.3.

6.2 Caracterização hidrogeológica da unidade eólica.

Para a caracterização hidrogeológica dos depósitos eólicos foram utilizados os dados levantados através das sondagens e da rede de poços de monitoramento instaladas na área. A tabela 1 mostra a localização dos poços (coordenadas geográficas) e suas respectivas altitudes.

Tabela 1. Localização e cotas dos poços de monitoramento.

Poços	Coordenadas Geográficas - SIRGAS 2000		Altitudes (m)
	Latitude	Longitude	
PZ0 01	32°11'49.34"S	52°12'59.31"O	5,131
PZ0 02	32°12'30.93"S	52°12'50.39"O	5,818
PZ0 03	32°12'44.32"S	52°12'32.12"O	5,852
PZ0 04	32°13'10.97"S	52°11'59.93"O	3,848
PZ0 05	32°12'5.97"S	52°13'16.26"O	5,413
PZ0 06	32°12'50.87"S	52°13'10.71"O	6,451
PZ0 07	32°12'52.91"S	52°12'54.01"O	5,659
PZ0 08	32°13'30.39"S	52°12'26.93"O	3,934
PZ0 09	32°12'32.48"S	52°13'45.15"O	5,481
PZ0 10	32°12'54.87"S	52°13'43.35"O	5,862
PZ0 11	32°13'14.84"S	52°13'16.95"O	5,541
PZ0 12	32°13'45.88"S	52°12'43.90"O	4,167
PZ0 13	32°12'53.42"S	52°14'5.83"O	5,441
PZ0 14	32°13'25.74"S	52°13'44.68"O	6,004
PZ0 15	32°13'45.61"S	52°13'24.97"O	5,348
PZ0 16	32°14'14.52"S	52°13'8.01"O	3,485

Já a figura 13 ilustra, através de uma imagem do *Google Earth*, a localização dos poços de monitoramento.



Figura 13. Localização dos poços de monitoramento presentes na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

Todos os poços de monitoramento foram projetados e construídos com 3 m de profundidade. Tal decisão se deu por parte da empresa que forneceu os dados e está atribuída ao conhecimento do nível de água para a região, bem como o objetivo atingido por eles baseado em normas e termos de referências do órgão ambiental estadual Fundação Estadual de Proteção Ambiental – RS (FEPAM). A figura 14 mostra um perfil construtivo de forma detalhada e adotado para cada um dos poços.

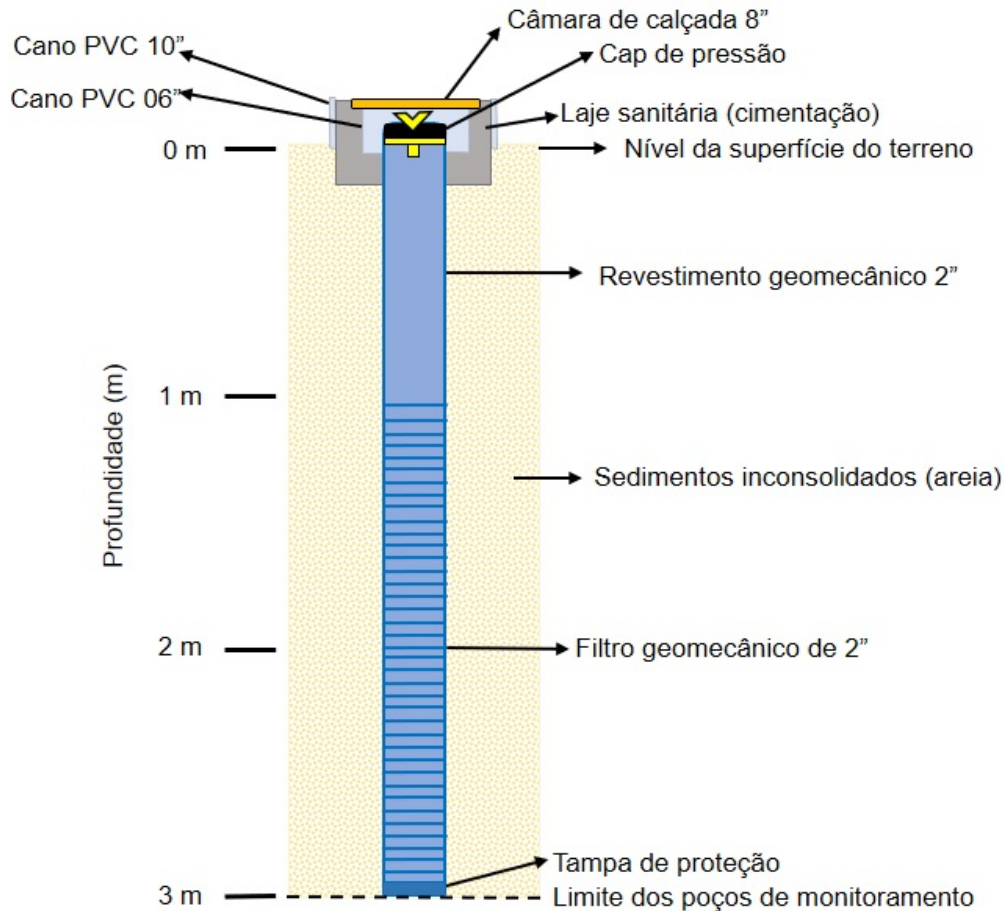


Figura 14. Perfil construtivo adotado para cada um dos poços de monitoramento.

A unidade sedimentar é formada por areias de granulometria fina e média, com grau de compactação que varia de pouco compacta a medianamente compacta. A média do nível de água encontrado nos poços durante o período de monitoramento foi de 0,817m.

Para a construção de um perfil hidrogeológico (Fig. 15) representativo para a área foram utilizados os dados da sondagem S14, cuja altitude é 5,73 m. Essa sondagem foi escolhida por estar localizada na porção central da área de estudo e inserida geomorfologicamente no local onde há lençóis de areias transgressivos. Estes lençóis constituem parte dos depósitos presentes na unidade eólica. Para esse perfil foi utilizado o mesmo intervalo definido para as seções geológicas.

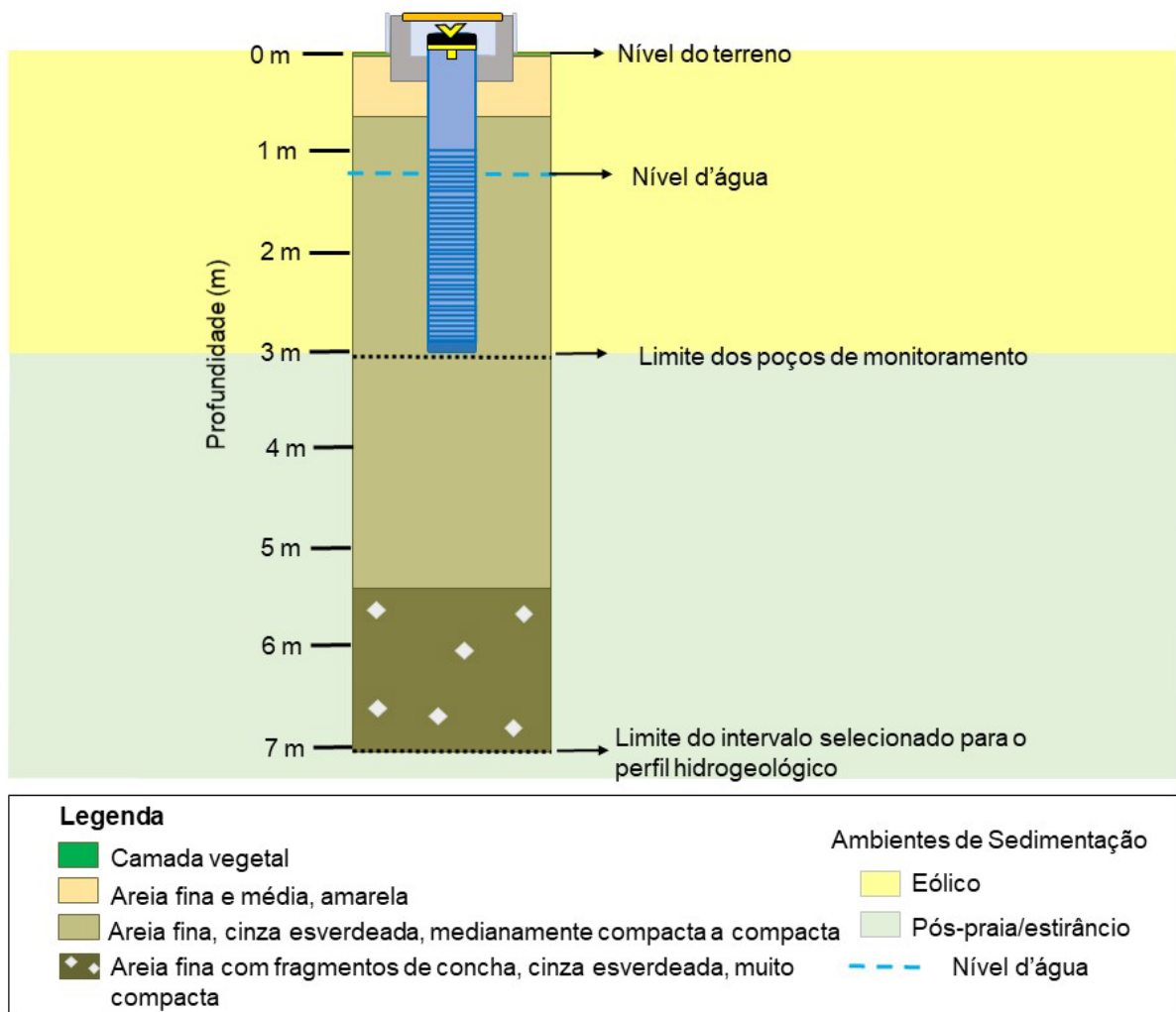


Figura 15. Perfil hidrogeológico e construtivo elaborado a partir de dados de sondagem e poço de monitoramento executados na área de estudo.

Os níveis d'água (N.A.) dos poços estão localizados muito próximos à superfície do terreno e os dados levantados por meio do monitoramento de 11 meses estão apresentados na tabela 2. O N.A. mais raso foi identificado no mês de junho, através do poço 11 e apresentou o nível d'água em 0,070 m de profundidade, enquanto que o N.A. mais profundo foi observado no mês de março, através do poço 06 com 1,87 m. Já a menor média de N.A. encontrada entre os poços foi no mês de agosto (final da estação de inverno) e a maior em março (início da estação de outono) com valores de 0,293 e 1,323 m de profundidade, respectivamente (Tab. 2).

Tabela 2. Dados de N.A. obtidos através do monitoramento dos níveis de água entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	0,670	0,740	0,990	1,150	1,020	1,290	0,790	0,400	0,310	0,380	0,290
Pzo 02	1,000	1,010	1,210	1,350	1,130	1,330	0,890	0,180	0,180	0,270	0,190
Pzo 03	1,000	1,030	1,250	1,400	1,210	1,430	1,230	0,600	0,570	0,580	0,570
Pzo 04	0,890	0,930	1,250	1,300	1,180	1,330	0,810	0,440	0,430	0,440	0,400
Pzo 05	0,910	0,990	1,200	1,370	1,240	1,430	0,930	0,330	0,250	0,200	0,160
Pzo 06	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740
Pzo 07	1,020	0,970	1,200	1,320	1,140	1,310	0,870	0,220	0,200	0,260	0,200
Pzo 08	0,790	0,970	1,160	1,260	1,100	1,240	0,830	0,420	0,360	0,550	0,300
Pzo 09	1,000	1,050	1,240	1,380	1,270	1,420	0,940	0,260	0,220	0,260	0,220
Pzo 10	0,790	0,890	1,160	1,320	1,220	1,340	0,840	0,230	0,200	0,440	0,210
Pzo 11	0,790	0,780	1,000	1,100	0,960	1,080	0,650	0,120	0,070	0,110	0,090
Pzo 12	1,100	0,800	1,290	1,380	1,240	1,370	0,940	0,570	0,490	0,590	0,450
Pzo 13	0,940	0,960	1,130	1,300	1,170	1,410	0,980	0,630	0,440	0,570	0,490
Pzo 14	0,890	0,910	1,080	1,190	1,000	1,160	0,740	0,260	0,130	0,300	0,170
Pzo 15	0,720	0,770	1,020	1,210	1,110	1,310	0,870	0,210	0,130	0,230	0,100
Pzo 16	0,700	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,130	0,110	0,130	0,100

A seguir serão apresentados os dados obtidos através do INMET para os acumulados mensais de precipitação pluviométrica para os 11 meses de monitoramento dos poços. Os maiores acumulados de precipitação ocorreram entre os meses de fevereiro e julho de 2011 com destaque para o mês de março (Fig. 16) com 279 mm de precipitação. Os menores acumulados permaneceram entre os meses de outubro de 2010 e janeiro de 2011, com ênfase para outubro onde foram somados apenas 9 mm para todo o mês.

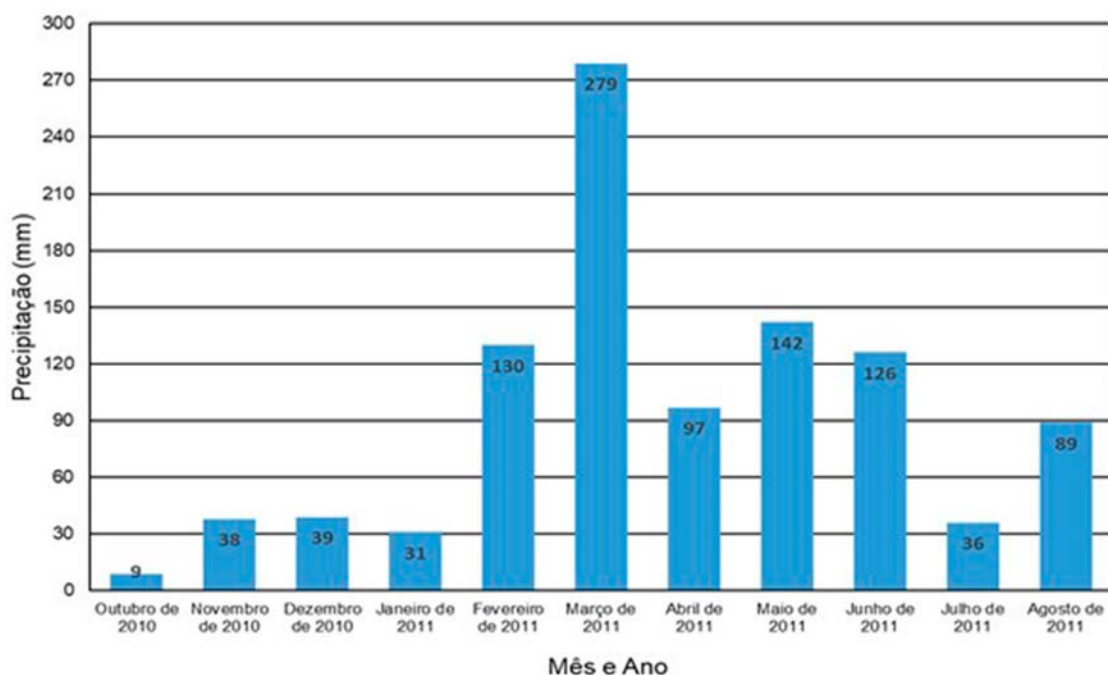


Figura 16. Dados pluviométricos (INMET) para o município de Rio Grande .

Na comparação entre os acumulados pluviométricos relacionados com as médias mensais dos níveis d'água (Tab. 3), identificou-se que a partir de abril de 2011 os N.A. elevaram-se, diminuindo as médias mensais, principalmente para os meses de maio, junho, julho e agosto de 2011. Tal observação demonstra que a precipitação pluviométrica influenciou diretamente nas elevações dos níveis de água e a estação do ano com temperatura mais baixas retardou esse rebaixamento. Já a média mais alta foi encontrada em março de 2011, demonstrando que a menor recarga do aquífero coincide com a baixa precipitação e com a estação do ano com temperaturas mais altas, contribuindo para o rebaixamento do N.A.

Tabela 3. Dados estatísticos dos níveis de água.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	0,906	0,919	1,165	1,298	1,153	1,323	0,884	0,364	0,301	0,381	0,293
Mínimo	0,670	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,120	0,070	0,110	0,090
Máximo	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740

6.3 Avaliação do fluxo de água subterrânea na camada aquífera eólica.

O sentido de fluxo da água subterrânea foi reconhecido a partir das diferenças das cargas hidráulicas do aquífero. Essas cargas (Tab. 4) foram obtidas subtraindo-se as altitudes de cada poço com o seu respectivo nível de água encontrado através do monitoramento mensal.

Tabela 4. Dados das cargas hidráulicas obtidas através do monitoramento dos níveis de água entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	4,461	4,391	4,141	3,981	4,111	3,841	4,341	4,731	4,821	4,751	4,841
Pzo 02	4,818	4,808	4,608	4,468	4,688	4,488	4,928	5,638	5,638	5,548	5,628
Pzo 03	4,852	4,822	4,602	4,452	4,642	4,422	4,622	5,252	5,282	5,272	5,282
Pzo 04	2,958	2,918	2,598	2,548	2,668	2,518	3,038	3,408	3,418	3,408	3,448
Pzo 05	4,503	4,423	4,213	4,043	4,173	3,983	4,483	5,083	5,163	5,213	5,253
Pzo 06	5,161	5,151	4,841	4,651	4,731	4,581	5,061	5,621	5,721	5,661	5,711
Pzo 07	4,639	4,689	4,459	4,339	4,519	4,349	4,789	5,439	5,459	5,399	5,459
Pzo 08	3,144	2,964	2,774	2,674	2,834	2,694	3,104	3,514	3,574	3,384	3,634
Pzo 09	4,481	4,431	4,241	4,101	4,211	4,061	4,541	5,221	5,261	5,221	5,261
Pzo 10	5,072	4,972	4,702	4,542	4,642	4,522	5,022	5,632	5,662	5,422	5,652
Pzo 11	4,751	4,761	4,541	4,441	4,581	4,461	4,891	5,421	5,471	5,431	5,451
Pzo 12	3,067	3,367	2,877	2,787	2,927	2,797	3,227	3,597	3,677	3,577	3,717
Pzo 13	4,501	4,481	4,311	4,141	4,271	4,031	4,461	4,811	5,001	4,871	4,951
Pzo 14	5,114	5,094	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834
Pzo 15	4,628	4,578	4,328	4,138	4,238	4,038	4,478	5,138	5,218	5,118	5,248
Pzo 16	2,785	2,875	2,635	2,545	2,755	2,645	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385

Nos mapas potenciométricos apresentados nas figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22 os fluxos encontrados apresentaram dois sentidos preferenciais: noroeste (sentido continente) e sudeste (sentido oceano). Além disso, pode-se identificar que os sentidos de fluxo se mantiveram os mesmos durante todo o período analisado, as únicas variações identificadas foram nos valores das cargas hidráulicas que aumentaram nos últimos 4 meses de monitoramento (Tab. 5). Essa mudança resulta de uma combinação de fatores tais como: elevada precipitação pluviométrica, acúmulo de precipitação de meses anteriores e de temperaturas mais baixas (inverno) fazendo com que a potencimetria seja maior devido ao aumento na recarga do aquífero, enquanto que em meses de menor precipitação e temperaturas mais altas (verão) as cargas diminuíram pela baixa taxa de recarga do aquífero ocasionada pela baixa precipitação.

Tabela 5. Dados estatísticos das cargas hidráulicas.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	4,308	4,295	4,050	3,917	4,062	3,892	4,330	4,850	4,913	4,833	4,922
Mínimo	2,785	2,875	2,598	2,545	2,668	2,518	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385
Máximo	5,161	5,151	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834

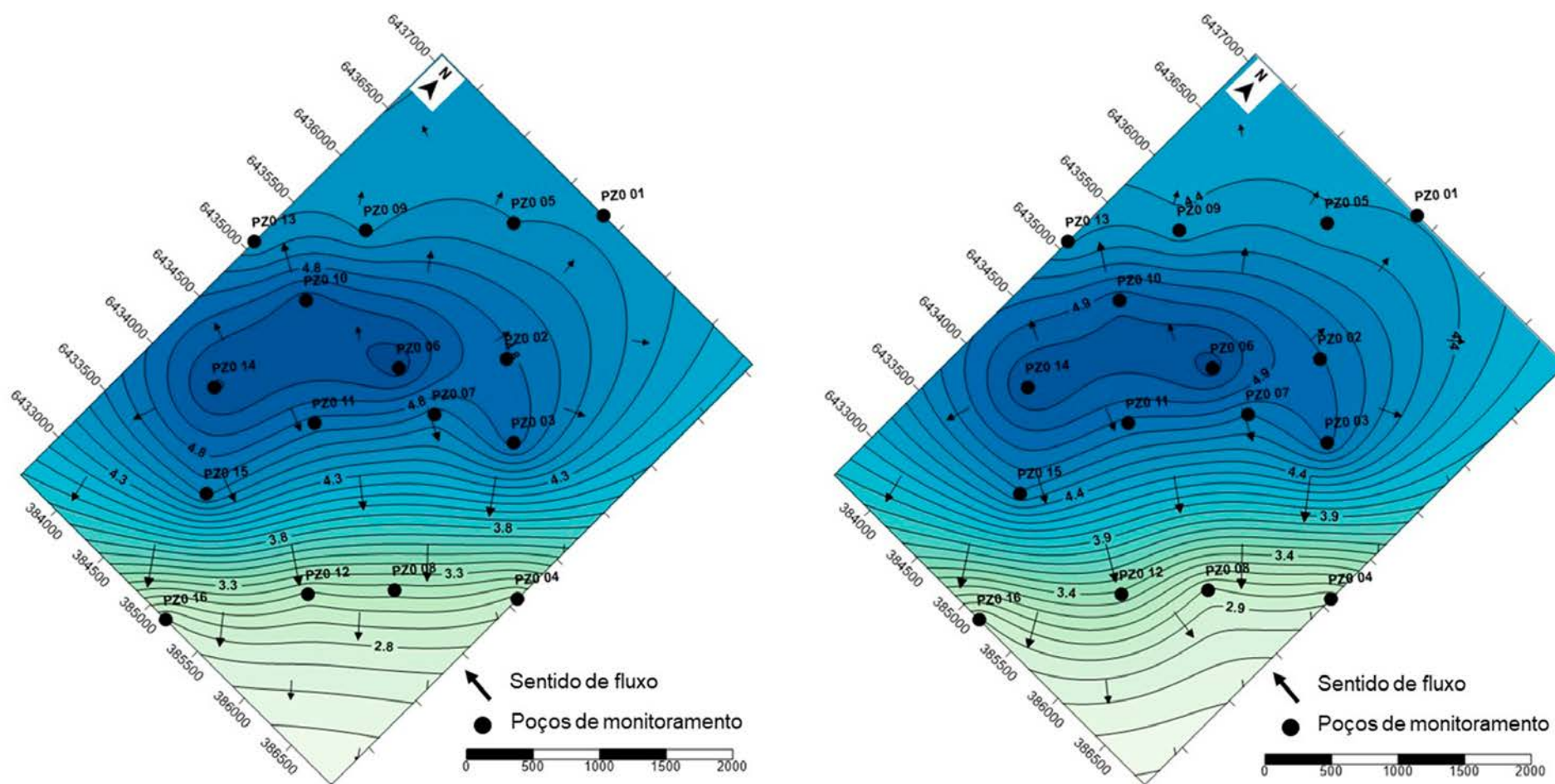


Figura 17. Mapas potenciométricos para os meses de outubro 2010 (9 mm) e novembro 2010 (38 mm) com seus acumulados mensais de pluviometria.

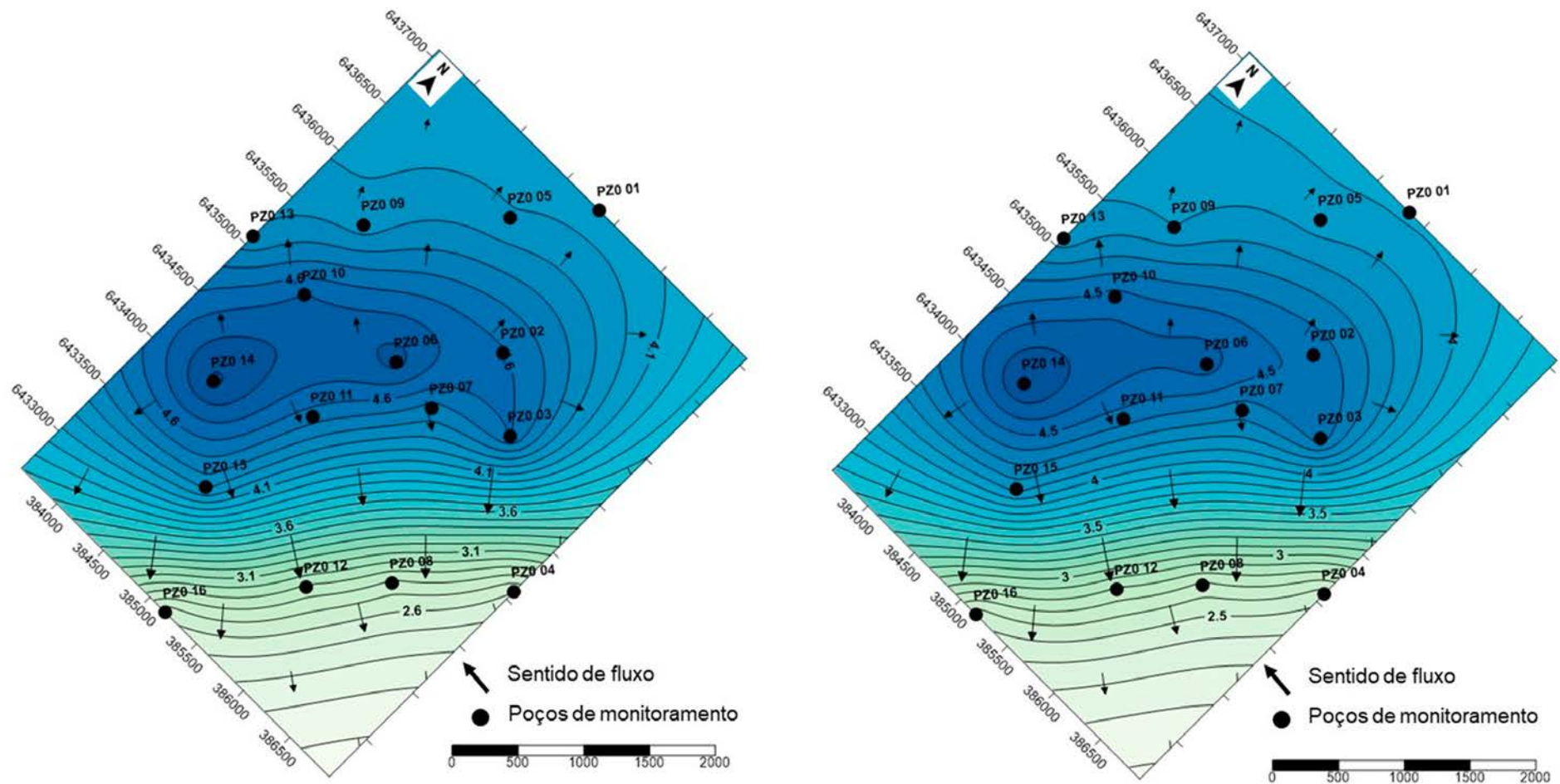


Figura 18. Mapas potenciométricos para os meses de dezembro 2010 (39 mm) e janeiro 2011 (31 mm) com seus acumulados mensais de pluviometria.

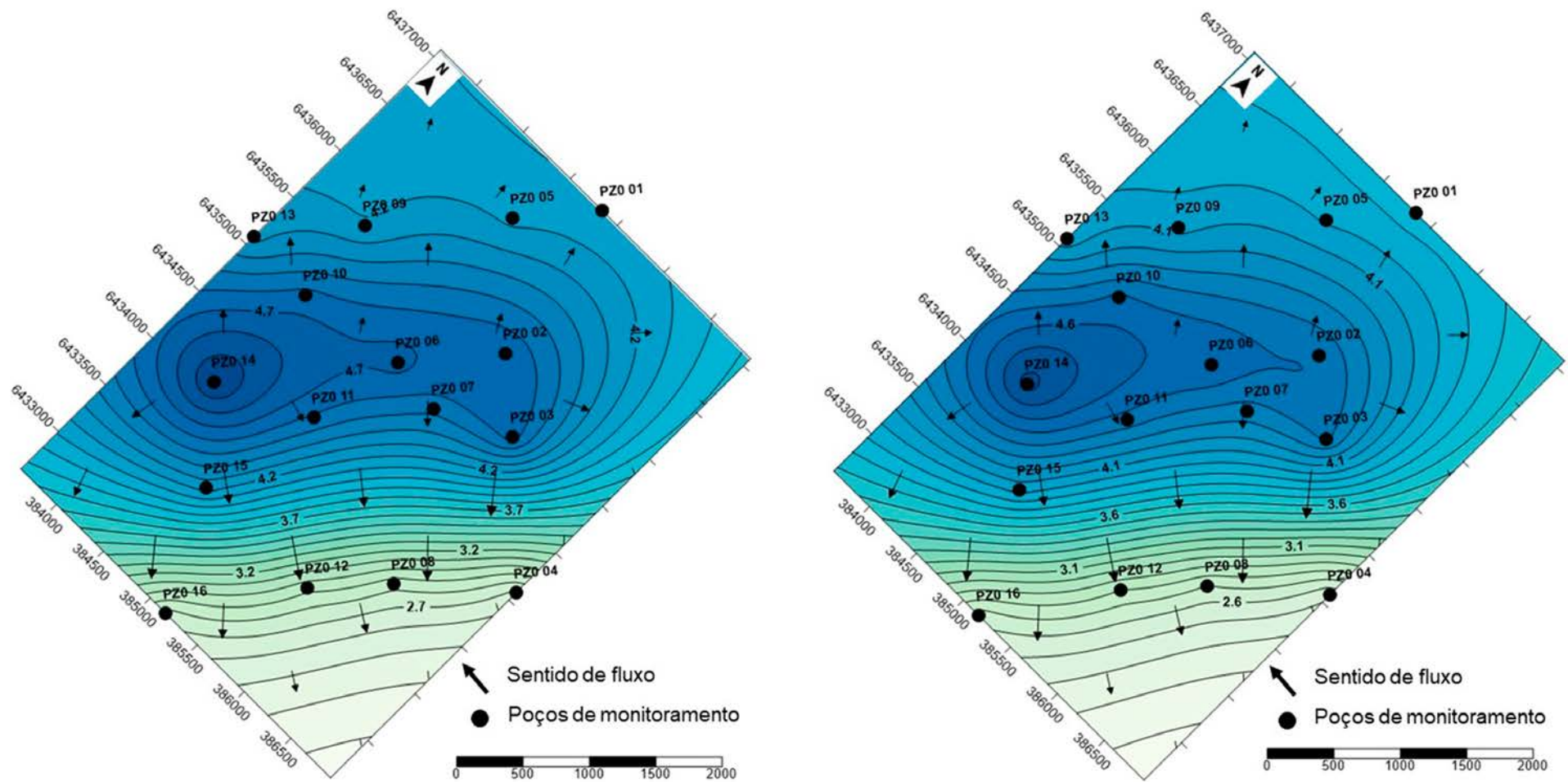


Figura 19. Mapas potenciométricos para os meses fevereiro 2011 (130 mm) e março 2011 (279 mm) com seus acumulados mensais de pluviometria.

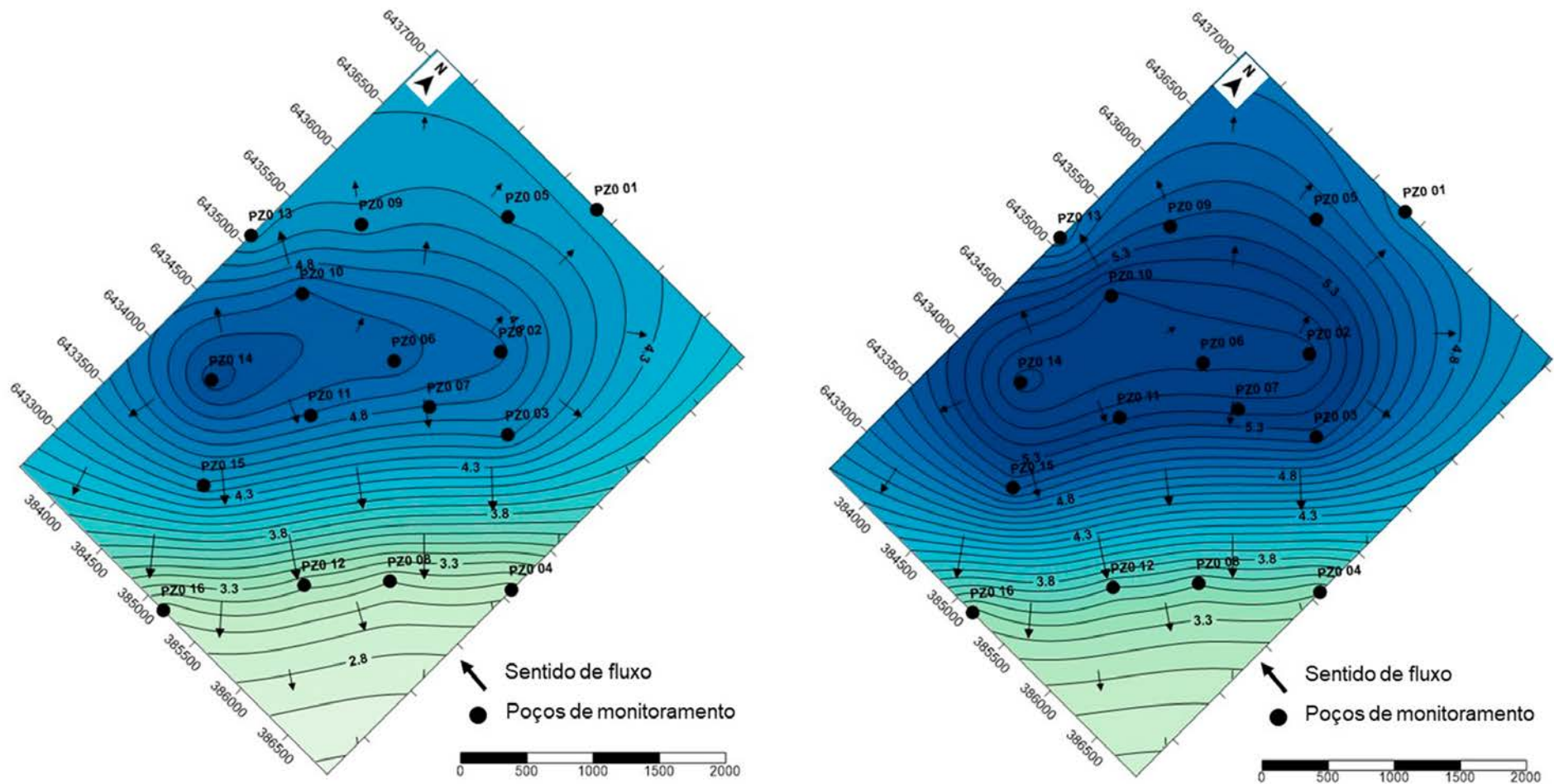


Figura 20. Mapas potenciométricos para os meses de abril 2011 (97 mm) e maio 2011 (142 mm) com seus acumulados mensais de pluviometria.

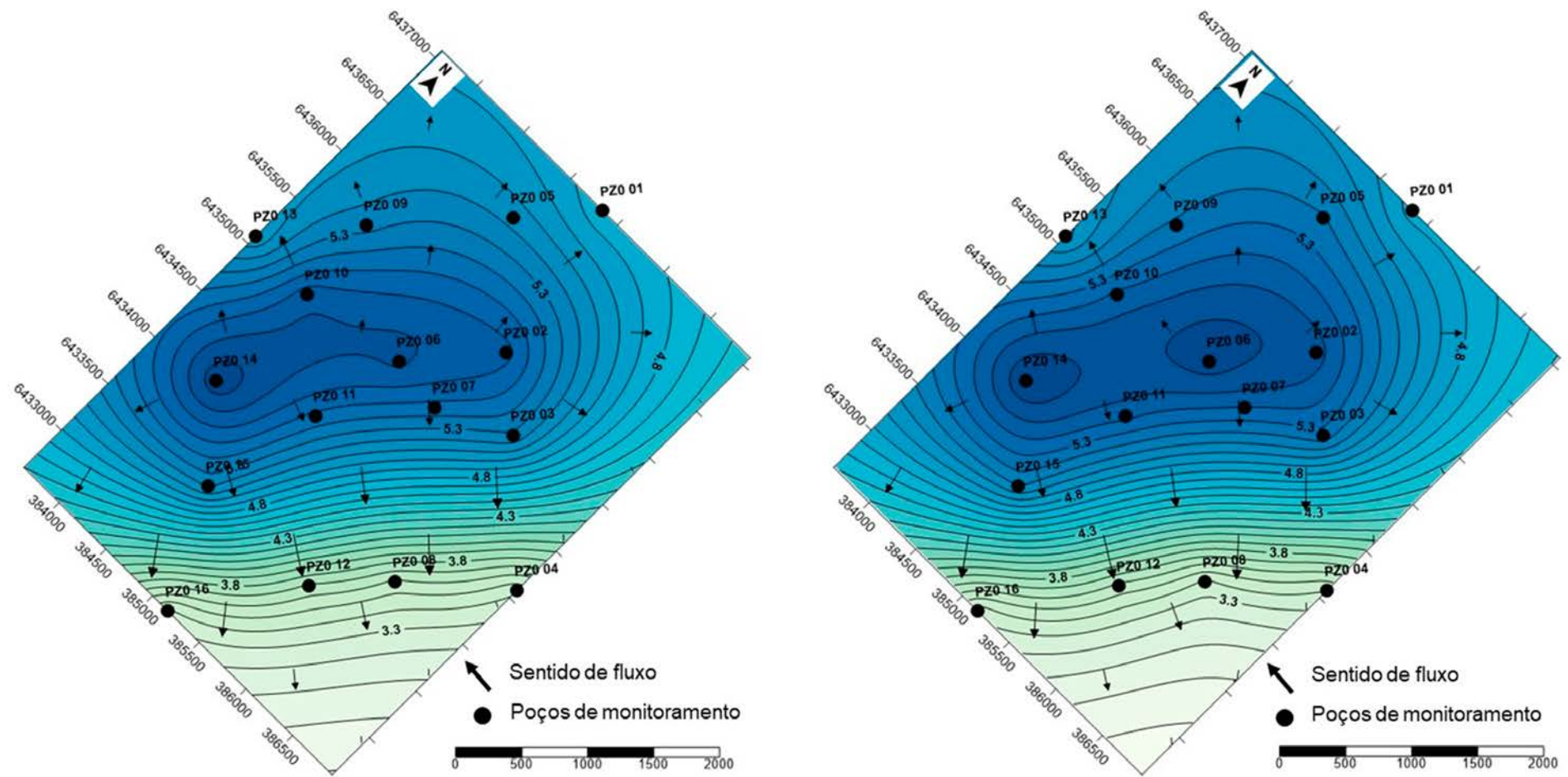


Figura 21. Mapas potenciométricos para os meses de junho 2011 (126 mm) e julho 2011 (36 mm) com seus acumulados mensais de pluviometria.

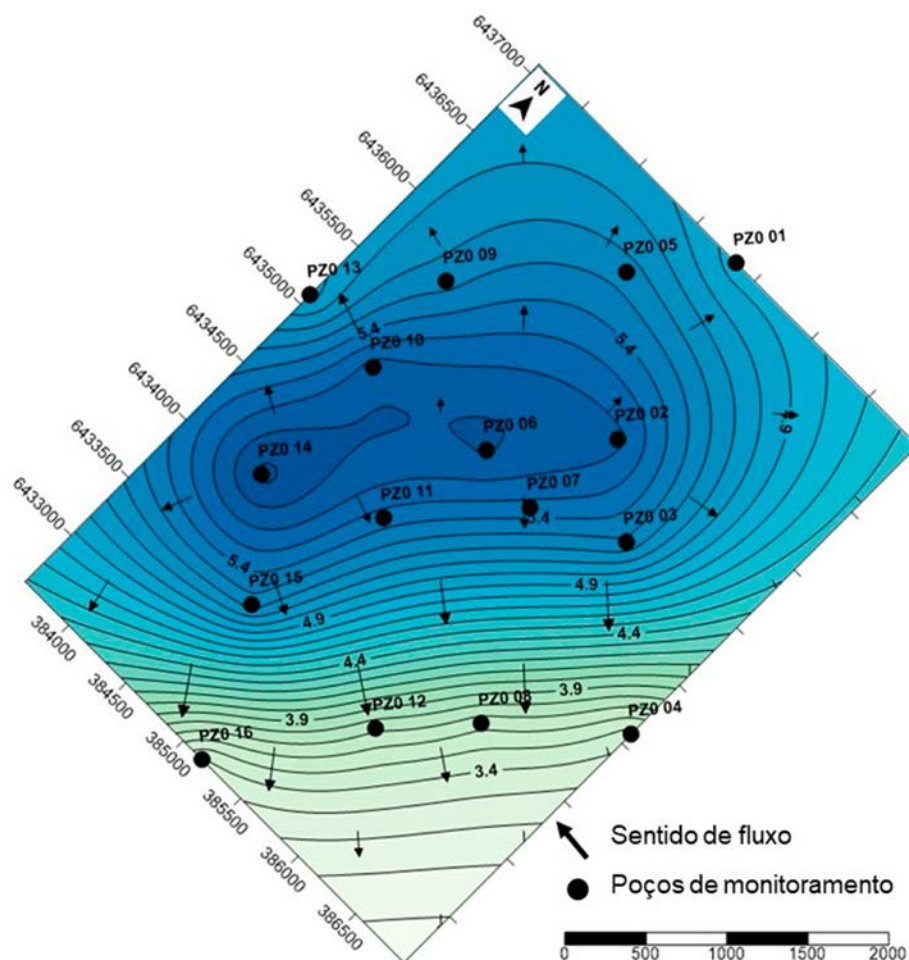


Figura 22. Mapa potenciométrico para o mês de agosto 2011 (89 mm) com seu acumulado mensal de pluviometria.

A mudança de sentido do fluxo da água subterrânea coincide com o alto topográfico observado através do mapa altimétrico apresentado no tópico 6.1, mostrando assim que a topografia da área tem influência nas direções preferenciais de fluxo ao criar um divisor de águas.

A geologia da unidade eólica caracterizada por areias de granulometria muito fina, fina e média, com grau de compactação que varia de pouca a medianamente compacta também pode interferir nas mudanças de sentido do fluxo. Essa mudança pode ocorrer ainda dentro da mesma unidade em função das alterações no grau de compactação ou quando a água encontra outras unidades subsequentes com diferentes características texturais e de compactação como é o caso dos sedimentos que formam a unidade praial.

Salienta-se que a água possui capacidade de infiltração mais rápida e melhor percolação entre os sedimentos com grãos tamanho areia e nenhum ou pouco grau

de compactação. Quando a água infiltra em camadas que possuem material de granulometria mais fina e que estão conseqüentemente mais compactadas uma “barreira” é criada fazendo que a mesma seja redirecionada para locais que apresentem camadas com sedimentos de maior granulometria e menor grau de compactação podem assim alterar o sentido de fluxo. Isso já foi observado no estudo realizado por Haitjema & Mitchell-Bruker (2005) que demonstraram que o controle de fluxo da superfície freática, além da topografia, é condicionado pelas taxas de recarga, condutividade hidráulica, transmissividade e extensão do aquífero.

O perfil de GPR interpretado permitiu observar que a morfologia do terreno bem como a maioria das reflexões mergulha suavemente no sentido do oceano, ambas contribuindo dessa forma para que o sentido de fluxo, para aquele local, ocorra em sentido ao mar. Acredita-se que se fossem analisados perfis partindo-se do alto topográfico existente na porção central da área, sentido noroeste, também seria possível identificar e correlacionar a morfologia da superfície com a geometria das camadas com leve inclinação no sentido noroeste (NW), ou seja, sentido contrário (continente).

A seguir será apresentado um perfil esquemático (Fig. 23) da seção geológica demonstrando a correlação entre a geomorfologia, as litologias, ambientes de sedimentação, níveis d’água e os sentidos preferenciais de fluxo da água.

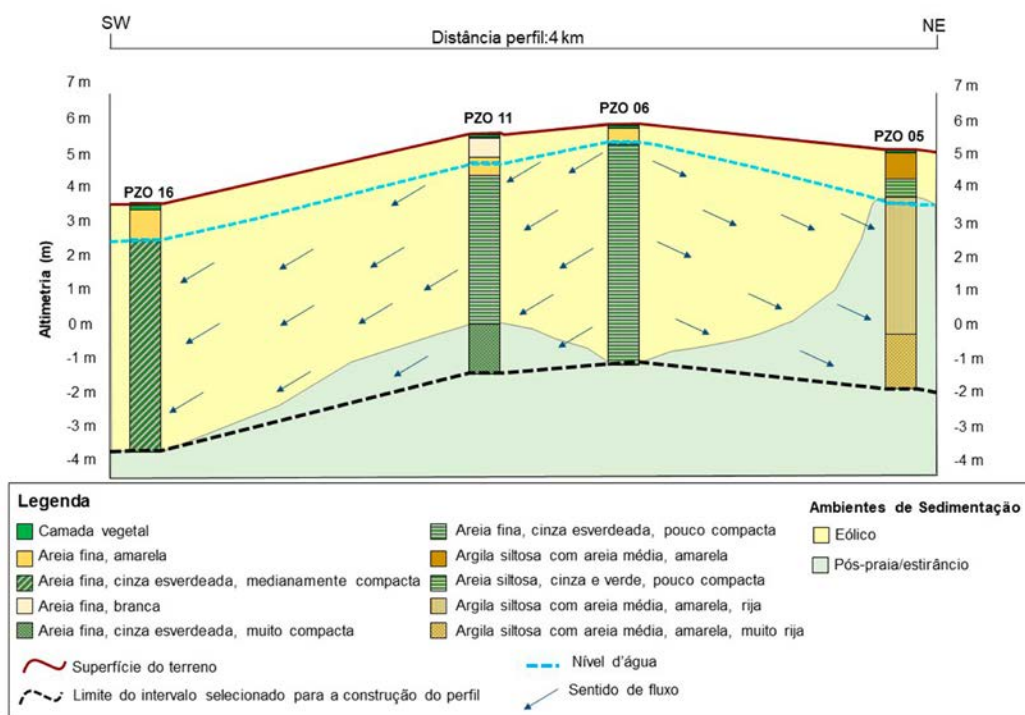


Figura 23. Perfil esquemático da seção geológica.

7 CONCLUSÕES

A partir da compilação de dados existente na área de estudo e da análise e interpretação hidrogeológica foi possível identificar que o fluxo de água subterrânea na unidade eólica possui dois sentidos de fluxo preferenciais: noroeste (sentido continente) e sudeste (sentido oceano). Logo o movimento da água subterrânea em aquíferos costeiros que propicia uma circulação regional e preferencial da água subterrânea do continente para o oceano (Manoel Filho, 2008) pode ser alterado quando realizada uma análise em escala local. Essas mudanças estão associadas a diversos fatores topográficos e geológicos, comprovando assim a hipótese apresentada.

Nesse estudo foi verificado que o sentido de fluxo da água subterrânea é alterado nas porções mais elevadas do terreno demonstrando dessa forma que a topografia da área tem influência nas mudanças do fluxo ao criar um divisor de águas.

Com base no monitoramento dos poços foi possível identificar que os níveis d'água (N.A.) estão localizados muito próximos à superfície do terreno e estão inseridos nas camadas que correspondem aos depósitos eólicos. O N.A. mais raso apresentou o nível d'água em 0,07 m de profundidade, enquanto que o mais profundo 1,87 m.

Além disso, identificou-se que os sentidos de fluxo se mantiveram os mesmos durante todo o período analisado, alterando apenas os valores das cargas hidráulicas. Essa alteração se deu ao longo dos últimos 4 meses de monitoramento em decorrência das altas taxas de precipitação pluviométrica, acúmulo da precipitação de meses anteriores e de temperaturas mais baixas elevando a potenciometria devido ao aumento de recarga do aquífero.

A caracterização geológica e geomorfológica foi realizada com base em dados de sondagens, poços de monitoramento e levantamento de uma seção de GPR. A unidade eólica possui uma espessura de aproximadamente 3 m e é formada por areias de granulometria muito fina, fina e média, com grau de compactidade que varia de pouca a medianamente compacta. Essas características texturais e geotécnicas também contribuem nas mudanças de sentido do fluxo. A mesma pode ser influenciada ainda dentro de uma mesma unidade em função das alterações no grau de compactação ou quando a água percola até outras unidades subsequentes com

sedimentos de menor granulometria e maior grau de compactação, como é o caso dos sedimentos que compõem a unidade praial.

A seção de GPR foi de fundamental importância no reconhecimento do padrão de empilhamento estratigráfico, espessura e delimitação das camadas, bem como a identificação dos ambientes deposicionais. Essa metodologia permitiu observar que tanto a morfologia da superfície como a maioria das reflexões em subsuperfície mergulham suavemente no sentido do oceano, contribuindo dessa forma para que o sentido de fluxo, para aquele local, ocorra em sentido sudeste (SE). Partindo dessa constatação, acredita-se que se fossem realizadas interpretações dos perfis partindo-se do alto topográfico existente na porção central da área em direção ao continente, também seria possível identificar e correlacionar a morfologia da superfície com a geometria das camadas e ambos estariam com uma leve inclinação no sentido noroeste (NW).

Assim, concluiu-se que a topografia da área de estudo é o principal fator de influência no sentido de fluxo de água subterrânea, porém é preciso considerar que há também a contribuição das alterações provocadas pela granulometria e grau de compactação dos sedimentos, bem como da geometria deposicional das camadas.

Esse estudo forneceu resultados importantes que servirão de subsídios para o gerenciamento de águas subterrâneas em aquíferos costeiros e contribuirão para que novos estudos possam ser desenvolvidos levando em consideração a escala local de cada área.

8 REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. 2001. *ABNT NBR 6484: Solo: Sondagens de simples reconhecimento com SPT: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT, 17p.

Andrade, C.F.F. *et al.* 2012. Fluxos de nutrientes associados às descargas de água subterrânea para a Lagoa Mangueira (Rio Grande do Sul, Brasil). *Química Nova*, 35(1): 5-10. Disponível em: <<https://repositorio.furg.br/handle/1/4512>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

Araújo, L.C.L. 2017. *Reconhecimento dos elementos deposicionais da lagoa do Violão na Serra Sul de Carajás: um estudo a partir de registros sismoestratigráficos*. Belém, 60p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11923>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

ARCGIS Online. 2022c. *Mapa base*. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

Bandeira, I.C.N. *et al.* 2007. Fluxo hídrico subterrâneos do município de Barcarena/PA como elemento de gestão integrada dos recursos hídricos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 17., 2007, São Paulo. Anais... São Paulo, ABRHidro, p. 1-14.

Barboza, E. G.; Tomazelli, L. J. 2003. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35, 260–264.

Barboza, E.G. *et al.* 2009. Ground-penetrating radar profiles of two Holocene regressive barriers in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 56(1): 579-583. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/25737643>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

Barboza, E.G. *et al.* 2011. Evolution of the Holocene coastal barrier of Pelotas Basin (southern Brazil) – a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 646-650. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26482251>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

Barboza, E.G. *et al.* 2013. Preservation potential of foredunes in the stratigraphic record. *Journal of Coastal Research*, SI 65(2): 1265-1270. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26490961>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

Barboza, E.G. *et al.* 2014. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 6., 2014, Porto Alegre. Resumos expandidos...* Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geofísica, p. 1-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.13140/2.1.3369.5047>>. Acesso em: 18 maio 2020.

Barboza, E.G. *et al.* 2018. Diachronic Condition Between Maximum Transgressive and Maximum Eustatic Sea-Level in Holocene: Subsidies for Coastal Management. *Journal of Coastal Research*, SI 85(1): 446–450. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26488257>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

Barboza, E.G. *et al.* 2021. Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. *Geosciences (Switzerland)*, v. 11, n. 8, 326.

Barletta, R.C. & Calliari, L.J. 2001. Determinação da intensidade das tempestades que atuam no Litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 117–124. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/20276>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

Bitencourt, V.J.B. *et al.* 2016. Geomorfologia e arquitetura deposicional de uma planície de cordões litorâneos na margem NE da Lagoa dos Quadros, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 43(3): 249-269. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/79582>>. Acesso em: 13 fev. 2022.

Bitencourt, V.J.B. *et al.* 2020. Padrões de empilhamento estratigráfico e seus reflexos na morfologia da barreira costeira holocênica no Litoral Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 21(3): 529-548. Disponível em: <<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1789>>. Acesso em: 13 fev. 2022.

Calliari L.J., Tozzi, H.A.M. & Klein A.H.F. 1998. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil – Rio Grande to Chuí, RS. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 231-247.

Calliari, L.J. & Klein, A.H.F. 1993. Características Morfodinâmicas e Sedimentológicas das Praias Oceânicas Entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 48-56. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21281>>. Acesso em: 10 fev. 2022.

Chandrajith, R. *et al.* 2014. Quantification of groundwater–seawater interaction in a coastal sandy aquifer system: a study from Panama, Sri Lanka. *Environmental Earth Sciences*, 72(3): 867–877. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-3010-y#citeas>>. Acesso em: 02 jun. 2022.

Clerot, L.C.P. 2004. *Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande – RS: evolução e caracterização como reservatório*. Porto Alegre, 75p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Clerot, L.C.P. *et al.* 2003a. Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande, RS: evolução e caracterização como reservatório. *In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 15., 2003, Porto Alegre. *Resumos...* Porto Alegre, UFRGS. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/40184>>. Acesso em: 04 jul. 2020

Clerot, L.C.P. *et al.* 2003b. Evolução da Barreira IV na região do Cassino, Rio Grande – RS. *In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA*, 2.; *CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, 9.; *CONGRESSO DO QUATERNÁRIO DOS PAÍSES DE LÍNGUA IBÉRICAS*, 2., 2003, Recife. *Anais...* Recife, ABEQUA. Disponível em: <https://www.abequa.org.br/trabalhos/quatcost_143.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2022.

Collischonn, L. & Rosa, M.L.C.C. 2022. Genesis of a coastal aquifer in the coastal plain of the Pelotas Basin, southern Brazil: Implications for stratigraphic Evolution.

Journal of South American Earth Sciences, 116: 1-36. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112200092X>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2008. *Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, escala 1:750.000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_rio_grande_sul.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2020.

Daniels, J.J., Roberts, R. & Vendl, M. 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1-3): 195-207. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0926985195900411>>. Acesso em: 25 maio 2020.

Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37(5): 531-551. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>>. Acesso em: 09 jun. 2020.

Dillenburg, S.R. *et al.* 2000. Influence of antecedente topography on coastal evolution as tested by the Shoreface Translation-Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16(1): 71-81. Disponível em: <<https://journals.flvc.org/jcr/article/view/80776>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

Dillenburg, S.R. *et al.* 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. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/26482252>>. Acesso em: 25 maio 2020.

Dillenburg, S.R. *et al.* 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/sed.12132>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

Dillenburg, S.R. *et al.* 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. *Marine Geology*, 390: 106-119. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002532271630319X?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

Dillenburg, S.R. *et al.* 2020. Sedimentary records of Marine Isotopic Stage 3 (Mis 3) in southern Brazil. *Geo-Marine Letters*, 40:1099-1108.

Dillenburg, S.R. & Barboza, E.G. 2014. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. *In: Martini, I.P. & Wanless, H.R. (ed.). Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. London, Geological Society, p. 333–352.

Freitas, M.A. *et al.* 2004. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: um avanço no conhecimento das águas subterrâneas no estado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. Anais...* Cuiabá, ABAS. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23530>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

Godolphim, M.F. 1976. *Geologia do Holoceno Costeiro do Município de Rio Grande, RS*. Porto Alegre, 146p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Haitjema, H.M. & Mitchell-Bruker, S. 2005. Are water tables a subdued replica of the topography? *Groundwater*, 43(6): 781–786. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>>. Acesso em: 01 set. 2022.

Hasenack, H. & Ferraro, L. 1989. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. *Pesquisas Em Geociências*, 22(22): 53–70. Disponível em: <<https://doi.org/10.22456/1807-9806.21456>>. Acesso em: 30 jul. 2021.

Hausman A. 1995. Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul - RS. *Acta Geológica Leopoldensia: Estudos Tecnológicos*, série Mapas, 2: 1-127.

Hein, C.J. *et al.* 2013. Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: Implications for complex coastal response to environmental

change. *Sedimentology*, 60(2): 469-502. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01348.x>>. Acesso em: 09 abr. 2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2013. *Mapa de estações*. [S. l.], Coordenação-Geral de Sistemas de Comunicação e Informação. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

Iritani, M.A. & Ezaki, S. 2009. *As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo, SMA, 104 p.

Jol, H.M. & Bristow, C.S. 2003. GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. *In*: Jol, H.M. & Bristow, C.S. (ed.). *Ground penetrating radar in sediments*, London, Geological Society, Special Publication, p. 9-28.

Leal, R.A. *et al.* 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.

Leandro, C.G., Barboza, E.G., Caron, F. & Jesus, F.A.N. 2019. GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 162: 1-12. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092698511830065X?via%3Dihub>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

Lisboa, N.A. *et al.* 2004. Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá.

Lopes R.P. 2013. *Reconstituição paleo-climática e paleo-ambiental do Pleistoceno Tardio no sul da planície costeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 198p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Machado, J.L.F. & Freitas, M.A. 2005. *Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final*. Porto Alegre, CPRM. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5249>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

Manoel Filho, J. 2008. Água Subterrânea em Meios Porosos Homogêneos: Ocorrência das águas subterrâneas. *In: Feitosa, F.A.C., Manoel Filho, J., Feitosa, E.C. & Demetrio, J.G.A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações.* Rio de Janeiro, CPRM.

Manzolini, R.P. *et al.* 2018. Process Control in The Geneses and Evolution of A Lagoon-Barrier System inside of The Patos Lagoon, South of Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 85: 651-655.

Martinho, C.T., Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A. 2009. Wave Energy and Longshore Sediment Transport Gradients Controlling Barrier Evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 25: 285-293.

Martins, L.R. 1967. *Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.* Porto Alegre, Escola de Geologia, UFRGS, p. 1-100.

Menezes, M.A.S. & Andrade, H.A. 1984. Exploração de água subterrânea nas dunas da Praia de Caponga - Ceará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 3., 1984, [s. l.]. Anais... [s. l.], p. 379-387.* Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24252>. Acesso em: 07 out. 2022.

Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R. & Sangree, J.B. 1977. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part six: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *In: Payton, C.E. (org.). Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration.* Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, p. 117-123.

Morais, J.B.A. 2011. *Caracteres hidrogeológicos do aquífero dunas para a gestão de recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza – Ceará.* Fortaleza, 79p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará.

Motta, V.F. 1967. *Estudo em modelo reduzido da regulamentação da embocadura lagunar de Tramandaí (Rio Grande do Sul).* Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Nascimento, E.A. 2013. *Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera barreira holocênica na região de Cassino, Rio Grande (RS)*. Porto Alegre, 67p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Bacharelado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/95520>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3–4): 261-330. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825204000054>>.

Acesso em: 09 nov. 2021.

Nimer, E. 1977. Clima. *In*: BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Geografia do Brasil: Região Sul*. Rio de Janeiro, IBGE/SERGRAF, p. 35-79.

Oliveira J.F. *et al.* 2016. Nearshore Dynamics & Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 75(1): 437-441.

Oliveira, J.F. 2019. *Dinâmica e a evolução costeira do litoral ao sul do cabo de Santa Marta, estado de Santa Catarina*. Porto Alegre, 178p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Oliveira, J.F. *et al.* 2017. O Aporte Sedimentar às Praias da Cigana e do Cardoso, Cabo de Santa Marta, Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(2): 295-310. Disponível em: <<https://doi.org/10.20502/rbg.v18i2.1160>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

Oliveira Jr., J.G., Medeiros, W.E. & Vital, H. 2000. Uso do radar penetrante no solo para caracterização de estruturas internas de dunas no município de São Bento do Norte. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PRAIAS ARENOSAS, 1., 2000, Itajaí. *Anais...* Itajaí, [s. n.], p. 134-137.

Pereira, A.J. 2001. *Investigação da estratigrafia da Região Costeira de Maricá – Praia de Itaipuaçu (RJ), através do Ground Penetrating Radar (GPR)*. Niterói, 93p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense.

Pereira, R. 2007. Análise do saldo de fluxo subterrâneo na caracterização hidrológica das lagoas do sistema Lacustre Bonfim, RN - Brasil. *HOLOS*, 3: 34–47. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/44>>. Acesso em: 07 out. 2020.

Pereira, R., Silva Jr., G.C. & Guimarães Jr., J.A. 2003. Estado da arte da Bacia Hidrogeológica do sistema Lacustre Bonfim-RN, Nordeste do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 17(1): 41-47. Disponível em: <<https://doi.org/10.14295/ras.v17i1.1311>>. Acesso em: 29 abr. 2020.

Pestana, R.C. & Botelho, M.A.B. 1997. Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea. *Revista Brasileira de Geofísica*, 15(1): 3-10. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbg/a/gGH6CCcLVsj7SmygJwtgTvc/?lang=pt>>. Acesso em: 06 out. 2021.

Reginato, P.A.R., Brancher, L., Schafer, A.E. & Lanzer, R.M. 2009. Água subterrânea utilizada para irrigação na planície costeira do rio grande do sul e seu risco a salinização. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 1., 2009, São Paulo. Anais...* São Paulo, ABAS.

Rocha, C.M. 2018. *Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na Costa Norte do RS (CNRS), Brasil*. Rio Grande, 132p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande. Disponível em: <<https://repositorio.furg.br/handle/1/10312>>. Acesso em: 04 maio 2020.

Rocha, C.M., Andrade, C.F.F. & Niencheski, L.F.H. 2015. Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 19(2): 76–84. Disponível em: <<https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/article/view/6194>>. Acesso em: 04 maio 2020.

Rocha, C.M., Barboza, E.G. & Niencheski, L.F.H. 2018. Radon activity and submarine groundwater discharge in different geological regions of a coastal barrier in Southern

Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(14): 527. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7711-0>>. Acesso em: 05 maio 2020.

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. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 323-327. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/SI75-065.1>>. Acesso em: 27 maio 2020.

Rosa, M.L.C.C. *et al.* 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 686–690.

Rosa, M.L.C.C. *et al.* 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. (ed.). *Autogenic Dynamics and Selforganization in Sedimentary Systems*. Oklahoma, SEPM, Special Publication, p. 176-197. Disponível em: <<https://doi.org/10.2110/sepmsp.106.13>>. Acesso em: 29 maio 2020.

Rosa, M.L.C.C. *et al.* 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.

Rossato, M.S. 2020. Os climas do Rio Grande do Sul: uma proposta de classificação climática. *Revista Entre-Lugar*, 11(22): 57–85. Disponível em: <<https://doi.org/10.30612/el.v11i22.12781>>. Acesso em: 02 jul. 2020.

Schenk, C.J. *et al.* 1993. Internal structure of an aeolian dune using ground penetrating radar. *Sedimentology*, 16: 61-69.

Silva, A.B. *et al.* 2014. Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 70: 205-210. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/43290953>>. Acesso em: 29 maio 2020.

Souza, R.T. *et al.* 2012. Hidrogeologia costeira: aspectos comparativos em área de sedimento recente do quaternário holoceno – litoral do Paraná. *Boletim Paranaense*

de *Geociências*, 66-67: 13-22. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/16950>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

Tomazelli, L.J. 1993. O Regime de Ventos e a Taxa de Migração das Dunas Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 20(1): 18-26. Disponível em: <<https://doi.org/10.22456/1807-9806.21278>>. Acesso em: 02 jul. 2020.

Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 1992. Considerações Sobre o Ambiente Praial e a Deriva Litorânea de Sedimentos ao Longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 19(1): 3-12. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/21318>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 2000. O cenozóico costeiro do Rio Grande do Sul. *In*: Holz M. & De Ros L.F. (ed.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/UFRGS, p. 375–406.

Troian, G.C. *et al.* 2020. Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, 34(3): 264–274.

Vail P.R., Mitchum Jr., R.M. & Thompson III, S. 1977. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part three: relative changes of sea level from coastal onlap. *In*: Payton, C.E. (org.). *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, p. 63-81.

Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J. 1995. *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas*. Porto Alegre, CECO/IG/UFRGS, 8: 1-45.

Villwock, J.A. *et al.* 1986. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. *In*: Rabassa, J. (ed.). *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. London, CRC Press, p. 79-97.

Villwock, J.A. *et al.* 1994. *Mapa Geológico da Província Costeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CECO, Instituto de Geociências, UFRGS, escala 1:1.000.000.

9 ARTIGO SUBMETIDO

Esta seção contempla o artigo relacionado a este trabalho e submetido à Revista *Águas Subterrâneas*. A carta comprovando a submissão encontra-se no Anexo.



AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DO CASSINO/RS.

EVALUATION OF GROUNDWATER FLOW IN THE COASTAL AQUIFER SYSTEM ASSOCIATED WITH HOLOCENIC WIND AEOLIAN DEPOSITS IN THE CASINO/RS REGION.

RESUMO

O comportamento do fluxo da água subterrânea em aquíferos costeiros pode ser influenciado localmente por fatores geológicos, geomorfológicos, topográficos, hidrogeológicos, climáticos, antrópicos. Esse trabalho tem como objetivo avaliar o sentido de fluxo da água subterrânea associado ao pacote de sedimentos eólicos e que fazem parte do Sistema Aquífero Costeiro (SAC) presente na região do Cassino/RS. Foram levantados e analisados dados já existentes de sondagens, poços de monitoramento e variações mensais dos níveis de águas. Também foram executados levantamentos de georadar que possibilitaram melhorar a avaliação da espessura e da geometria das camadas dos depósitos sedimentares que ocorrem em subsuperfície. Os resultados permitiram caracterizar as litologias encontradas, analisar o comportamento das variações dos níveis estáticos e da potenciometria, identificar a arquitetura deposicional dos estratos em subsuperfície e delimitar os depósitos sedimentares. A partir dos resultados foi identificado que a morfologia do terreno, as características texturais e geotécnicas dos depósitos sedimentares e o padrão de empilhamento estratigráfico das camadas são os fatores que condicionam localmente os sentidos de fluxo do aquífero associado ao pacote eólico. Portanto, esse estudo contribuiu significativamente no aumento do conhecimento hidrogeológico da região e demonstrou que o fluxo de água, mesmo em regiões próximas à linha de costa, pode ocorrer em diferentes sentidos devido à combinação dos fatores condicionantes.

Palavras-chave: fluxo de água subterrânea; hidrogeologia; aquíferos costeiros.

ABSTRACT

The flow behavior in coastal aquifers can be influenced locally by geological, geomorphological, topographic, hydrogeological, climatic, and anthropic factors. This paper aimed to evaluate the direction and controls of the groundwater flow linked to aeolian sediment layers, which are part of the Coastal Aquifer System (SAC) present in the Cassino/RS region. Drill holes, water levels, and ground penetrating radar surveys were applied. The results allowed us to characterize the lithologies, analyze the variability of static levels and flow power metrics, and identify the depositional architecture. As result, it was possible to identify that terrain's morphology, texture, and geotechnical characteristics of the sedimentary deposits, and the stratigraphic stacking pattern of layers are the factors that locally determine the aquifer's flow. This study contributed to the hydrological knowledge in the region and demonstrated that the water flow, even in regions nearby the coastline, may behave in variable directions due to local factors.

Keywords: groundwater flow; hydrogeology; coastal aquifer.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de aquíferos costeiros é de suma importância, pois em regiões litorâneas o uso de água subterrânea para o consumo humano e atividades ligadas à agricultura, indústria e comércio é expressivo, sendo que a demanda por esse recurso hídrico tem aumentado significativamente em consequência do crescimento populacional dessas áreas (CHANDRAJITH *et al.*, 2014). A maioria dos estudos desenvolvidos estão relacionados apenas com a avaliação hidrogeológica quantitativa e qualitativa, sendo muitos deles associados exclusivamente na identificação e análise da cunha salina.

O conhecimento e a avaliação sobre o fluxo da água subterrânea em aquíferos costeiros também possuem grande relevância para subsidiar os processos de gerenciamento desse valioso recurso natural. O fluxo de água nos aquíferos é governado pelo gradiente hidráulico, sendo que nos aquíferos costeiros o gradiente existente propicia uma circulação regional e preferencial da água subterrânea, que ocorre do continente para o oceano (MANOEL FILHO, 2008). No entanto, o fluxo de água subterrânea pode ser influenciado localmente por diversos fatores, tais como: geológicos/geomorfológicos (espessuras, geometrias e estruturas das camadas, granulometria, grau de consolidação dos sedimentos e formas de relevo), topográficos (variações altimétricas da superfície do terreno), hidrogeológicos (variações nos

processos de recarga), climáticos (precipitação pluviométrica), antrópicos (exploração da água subterrânea sem controle), entre outros.

O estudo realizado por Rocha, Andrade e Niencheski (2015) avaliou a descarga de água subterrânea (DAS) na região norte do litoral do Rio Grande do Sul (RS), tendo identificado que o fluxo é influenciado pelos processos de infiltração e advecção que ocorrem entre a região da encosta e da planície costeira. Os autores identificaram uma relação entre os aquíferos e as lagoas, com uma contribuição significativa da descarga da água subterrânea para as lagoas. Em continuidade a esses estudos, Rocha (2018) e Rocha et al. (2018) avaliaram as conexões e as interações entre a água superficial e subterrânea no litoral norte do RS. Nesses estudos foi identificado que a DAS é influenciada pela evolução e comportamento geológico (padrões de empilhamento estratigráfico progradacional e retrogradacional) dos depósitos sedimentares que formam as barreiras costeiras. Foi evidenciado que as variações na compactação, na estrutura, na granulometria e nas descontinuidades das camadas tem influência nos processos de descarga da água subterrânea, bem como no transporte de nutrientes.

Na região sul do litoral do RS, no Balneário do Cassino (Rio Grande/RS), o sistema aquífero costeiro tem grande importância como área de captação de água, porém os estudos hidrogeológicos são mais escassos e de escala regional, como por exemplo os realizados por Hausman (1995) e Machado & Freitas (2005). Um estudo mais detalhado foi desenvolvido por Nascimento (2013), que avaliou as características hidrogeológicas e hidroquímicas da camada aquífera associada aos depósitos holocênicos existentes na região. No entanto, esse estudo abordou de forma muito preliminar as condições de fluxo da água subterrânea.

Tendo em vista os resultados dos estudos anteriores e a premissa de que uma série de fatores tenham influência sobre o fluxo de água subterrânea, tem-se a hipótese de que, mesmo em regiões muito próximas à linha de costa, sejam encontrados fluxos em sentido divergente ao do oceano.

Nesse contexto, é apresentado um estudo hidrogeológico com avaliação do fluxo de água do sistema aquífero costeiro associado às camadas representadas pelo sistema deposicional eólico, bem como a identificação dos fatores que condicionam esse fluxo.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, em uma área pertencente ao Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS. (Figura 1).

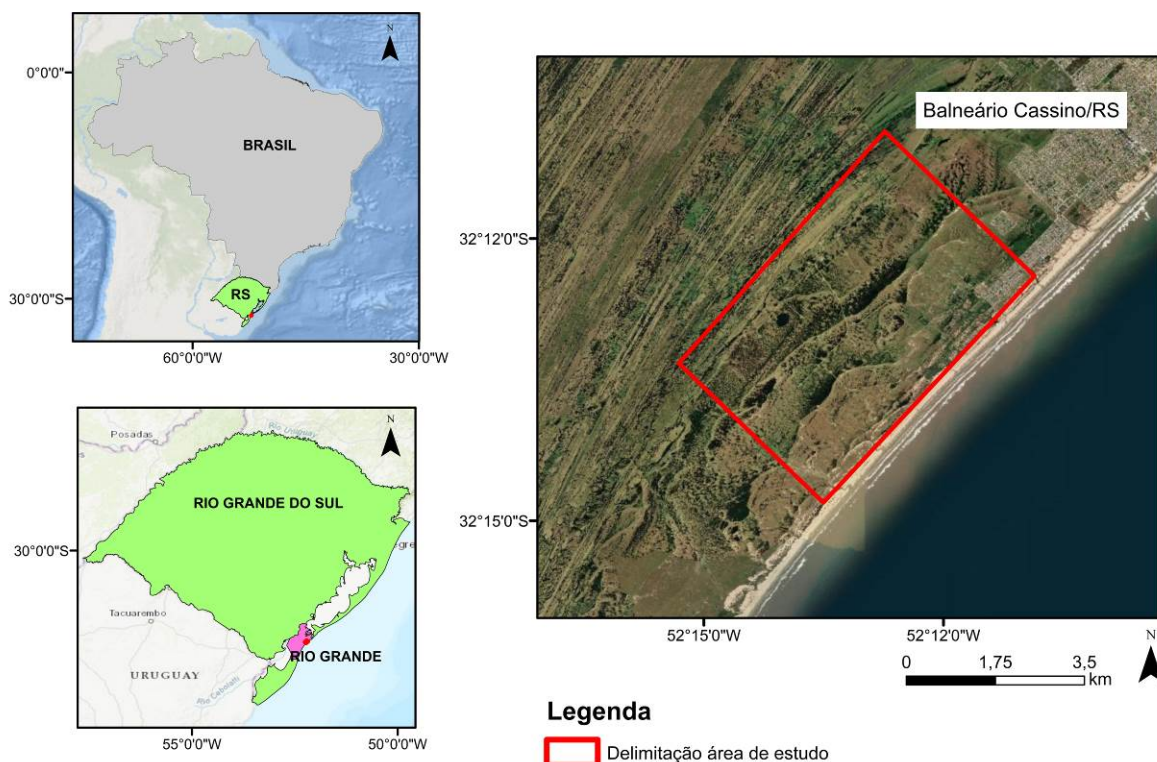


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo situada no Balneário Cassino, município de Rio Grande/RS (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

A área de estudo está inserida geologicamente no Sistema Depositional Laguna-Barreira IV (VILLWOCK *et al.*, 1986), formado durante os últimos 7 a 6 ka (DILLENBURG; BARBOZA, 2014), com o nível do mar em torno de 2 m acima do atual até 3 ka AP, quando então entrou em queda até o nível atual (BARBOZA; TOMAZELLI, 2033; BARBOZA *et al.*, 2021). A Barreira IV, na região do Cassino, apresenta um padrão de empilhamento estratigráfico que permite classificá-la como progradante (regressiva), ou seja, seu crescimento ocorre no sentido do oceano (DILLENBURG *et al.*, 2017).

A sucessão vertical de fácies apresenta depósitos marinhos (*offshore*) na base, sucedidos por depósitos de antepraia (*shoreface*), pós-praia e estirâncio (*foreshore*) e

uma pequena cobertura eólica no topo (CLEROT *et al.*, 2003). Os depósitos eólicos formados por dunas e por lençóis de areias transgressivos, objeto desse estudo, são compostos por areias quartzosas finas, bem selecionadas e arredondadas, e apresentam raras laminações plano-paralelas e cruzadas (DILLENBURG *et al.*, 2017).

Quanto ao contexto hidrogeológico, Nascimento (2013) realizou um estudo com o objetivo de caracterizar a unidade aquífera Barreira Holocênica na região do Cassino, Rio Grande/RS. Nessa região, a unidade apresentou uma espessura de aproximadamente 20 m e o aquífero exibiu dois comportamentos distintos, livre e semi-confinado, sendo esse último influenciado pela intercalação de lentes de argila em camadas mais profundas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Revisão bibliográfica e obtenção de dados existentes.

A revisão bibliográfica sobre o fluxo de água subterrânea e os estudos realizados para na região forneceram um arcabouço acerca do conhecimento da Hidrogeologia local. Além disso, um inventário e um cadastramento dos poços de monitoramento existentes na área de pesquisa foram elaborados. Dados construtivos dos poços, perfis litológicos e dados de monitoramento dos níveis d'água realizados durante 11 meses consecutivos, foram cedidos pela empresa que elaborou os estudos para o licenciamento do parque eólico Cassino.. Também foram obtidos perfis geológicos de sondagens (SPT) executadas na área (DILLENBURG *et al.*, 2017).

Dados dos índices pluviométricos foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o município de Rio Grande, para os meses de monitoramento dos níveis de água dos piezômetros.

3.2 Aquisição de dados geofísicos (GPR), processamento e interpretação.

Para o reconhecimento do padrão de empilhamento estratigráfico e a espessura das camadas dos depósitos sedimentares, foi utilizado o método geofísico do georadar (GPR).

O equipamento utilizado na aquisição dos dados é um modelo SIR-3000 da empresa GSSI™ (Geophysical Survey Systems, Inc.) acompanhado de antenas aéreas em um arranjo bi estático, operando com antenas de frequências centrais de 124 MHz, ambas fabricadas pela Radarteam Sweden AB. O método de levantamento utilizado de acordo com o arranjo das antenas foi o modo *Common Off Set* que

consiste em duas antenas (uma transmissora e outra receptora) posicionadas a uma distância de 1 m, que se deslocam simultaneamente. Durante a aquisição o Sistema GPR foi conectado a um receptor GNSS no modo cinemático, gerando um arquivo de posicionamento espacial, permitindo a obtenção de informações para o georreferenciamento das seções através do método do posicionamento diferencial. Os dados de posicionamento foram coletados com um sistema Trimble® PROXRT (datum: WGS84) pelo método pós-diferencial (DGNSS), com correção efetuada pela base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), utilizando-se a base de Pelotas. Os parâmetros utilizados na aquisição dos perfis de GPR seguiram os propostos por Barboza, Rosa e Caron (2014). Durante a aquisição foram aplicados filtros de ganho e de frequência de sinal para eliminação de ruídos e correção da saturação (passa bandas). A constante dielétrica utilizada durante a aquisição foi a de valor 10 conforme associação com os furos de sondagem (DILLENBURG *et al.*, 2011).

Os dados foram pós-processados através dos softwares Radan™ (GSSI – Geophysical Survey Systems, Inc.), Reflex-Win® (Sandmeier Geophysical Research) e Prism2® (Radar Systems, Inc.), aplicando filtros de remoção de ruídos de fundo, passa bandas, de ganho, da correção topográfica e da conversão de tempo em profundidade. A constante dielétrica utilizada para a conversão de tempo em profundidade foi a de valor 10, representando a velocidade de 0,12 m/ns (DANIELS *et al.*, 1995). A constante dielétrica foi validada a partir de dados litológicos obtidos através dos furos de sondagem na área, conforme proposto por Dillenburg *et al.* (2011). Na correção topográfica foram utilizados os dados de GNSS pós-processados, aplicou-se o intervalo de 1 s de amostragem, com uma precisão de 0,2 m.

As interpretações desses dados foram feitas com base nos princípios da sismoestratigrafia (MITCHUM JR.; VAIL; SANGREE, 1977; VAIL; MITCHUM JR.; THOMPSON III, 1977) adaptado para o GPR por Neal (2004). Foram interpretadas as terminações das reflexões nos limites superiores e inferiores de cada unidade analisando também a geometria externa e configuração interna de cada radarfácies. Para validar a interpretação dos ambientes deposicionais foi aplicada a análise do traço (LEANDRO *et al.*, 2019).

3.3. Caracterização geológica e topográfica

A caracterização geológica do aquífero associado aos depósitos eólicos foi realizada com base nas informações coletadas a partir dos sedimentos amostrados

em 32 sondagens do tipo SPT e em 16 poços de monitoramento (piezômetros) localizados na área de estudo. As sondagens foram perfuradas até os 30 m de profundidade e realizadas de acordo com a norma NRB6494 de execução e para análise de compactação foi adotada a norma NBR 7250 da ABNT.

O grau de compactação foi obtido através do número de golpes necessários para que o martelo de 65 kg, que cai de uma altura de 75 cm de altura, cravasse os primeiros e os últimos 30 cm do amostrador padrão no solo determinando assim o índice de resistência à penetração do solo (NSPT). Com esse material foi possível identificar as seguintes informações: NSPT; nível d'água, cotas em relação ao nível de referência escolhido, profundidade das camadas de sedimentos em relação à superfície do terreno e a classificação dos materiais, de acordo com a nomenclatura da NBR 6484/2001.

Tanto para a caracterização geológica como topográfica foi utilizado também os resultados obtidos através do levantamento da seção de GPR. O mapa topográfico para a área foi gerado com auxílio do software SURFER através da inserção de um banco de dados com as altitudes obtidas através do processamento das altitudes dos piezômetros cedidos pela empresa proprietária. As altitudes inseridas nesse banco de dados foram niveladas pelo método pós-diferencial (DGNSS), com correção efetuada pela base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), utilizando-se a base de Pelotas.

3.4. Caracterização hidrogeológica

A caracterização hidrogeológica do aquífero associado ao pacote de sedimentos eólicos foi realizada com base na interpretação dos dados dos poços de monitoramento e das sondagens existentes na área de estudo.

Para analisar as variações do nível estático foram utilizados os dados de 16 poços de monitoramento. Esse monitoramento foi realizado durante 11 meses consecutivos pela empresa proprietária do parque eólico do Cassino, com esses dados cedidos para a elaboração desse estudo.

Todos os poços foram nivelados com uso de GPS Diferencial (DGPS) e a referência de nível utilizada para calibração do equipamento e determinação do referencial altimétrico de superfície dos poços foi a RN/IBGE SAT-91715, localizada no Pier da Estação Naval de Rio Grande (RS). Os dados de altitude da boca dos poços e os de nível estático foram utilizados no cálculo das cargas hidráulicas. Com os dados

de carga hidráulica foram gerados mapas potenciométricos e de fluxo da água subterrânea. Esses mapas foram gerados com o emprego do software SURFER.

3.5. Avaliação do fluxo e circulação da água subterrânea.

A partir da confecção dos mapas potenciométricos tornaram-se conhecidos os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea. Essa avaliação foi realizada com a integração dos dados geológicos, perfil geofísico de GPR, e hidrogeológicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização geológica e morfológica dos depósitos eólicos.

A caracterização geológica e geomorfológica da área de estudo foi realizada a partir da compilação de informações obtidas através das sondagens, dos poços de monitoramento e da interpretação da seção de GPR. A Figura 2 sintetiza a localização de todos os levantamentos realizados.

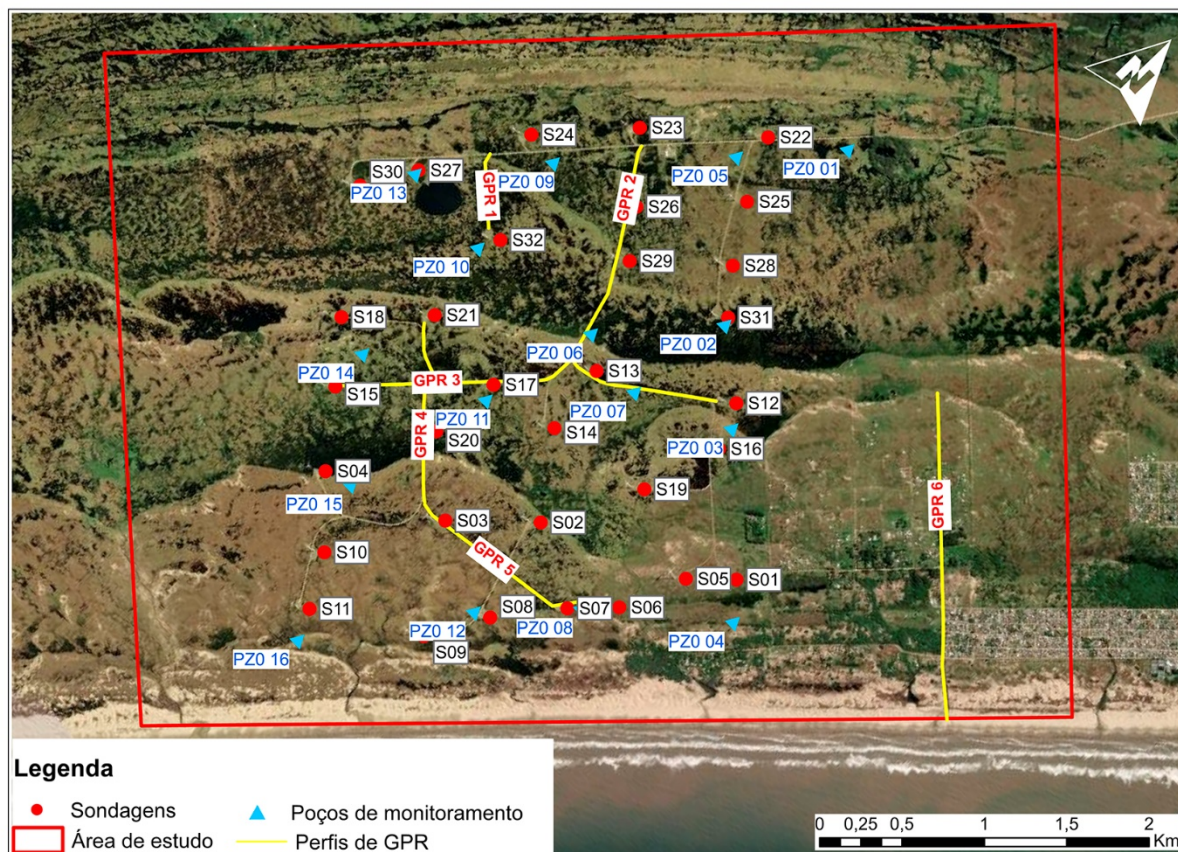


Figura 2. Localização das sondagens, poços de monitoramento e perfis de GPR executados na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

O depósito eólico, lençóis de areias transgressivos, é composto por areias quartzosas de granulometria muito fina, fina e média, bem selecionadas e de diferentes colorações (amarela, branca, cinza e cinza esverdeada). A compactidade dessa unidade variou de pouca a medianamente compacta.

De acordo com Clerot (2004) e Dillenburg *et al.* (2017) a principal característica observada na transição dos depósitos eólicos para os depósitos praias está na mudança do grau de compactação dos sedimentos, já que as características texturais dos sedimentos, em ambos os depósitos, são muito parecidas.

Embora o foco desse trabalho seja a unidade eólica (lençóis de areias transgressivos), a profundidade do intervalo analisado foi de 7 m para que fosse possível também observar e delimitar o contato entre a unidade eólica e a praia conforme descrito por Dillenburg *et al.* (2017).

De fato, a mudança descrita pelos autores foi observada nas variações do grau de compactação. O contato entre os depósitos eólicos e os praias se deu próximo aos 3/4 m de profundidade onde a compactidade altera-se de medianamente compacta para compacta e coincide com as interpretações feitas através da seção de GPR.

Na Figura 3A são apresentadas a localização das sondagens utilizadas na construção da seção geológica e que são representativas para a área. Já na Figura 3B é ilustrada a seção geológica com direção sul/norte, contemplando a correlação litológica entre as sondagens S11, S10, S20, S17, S29 e S22.

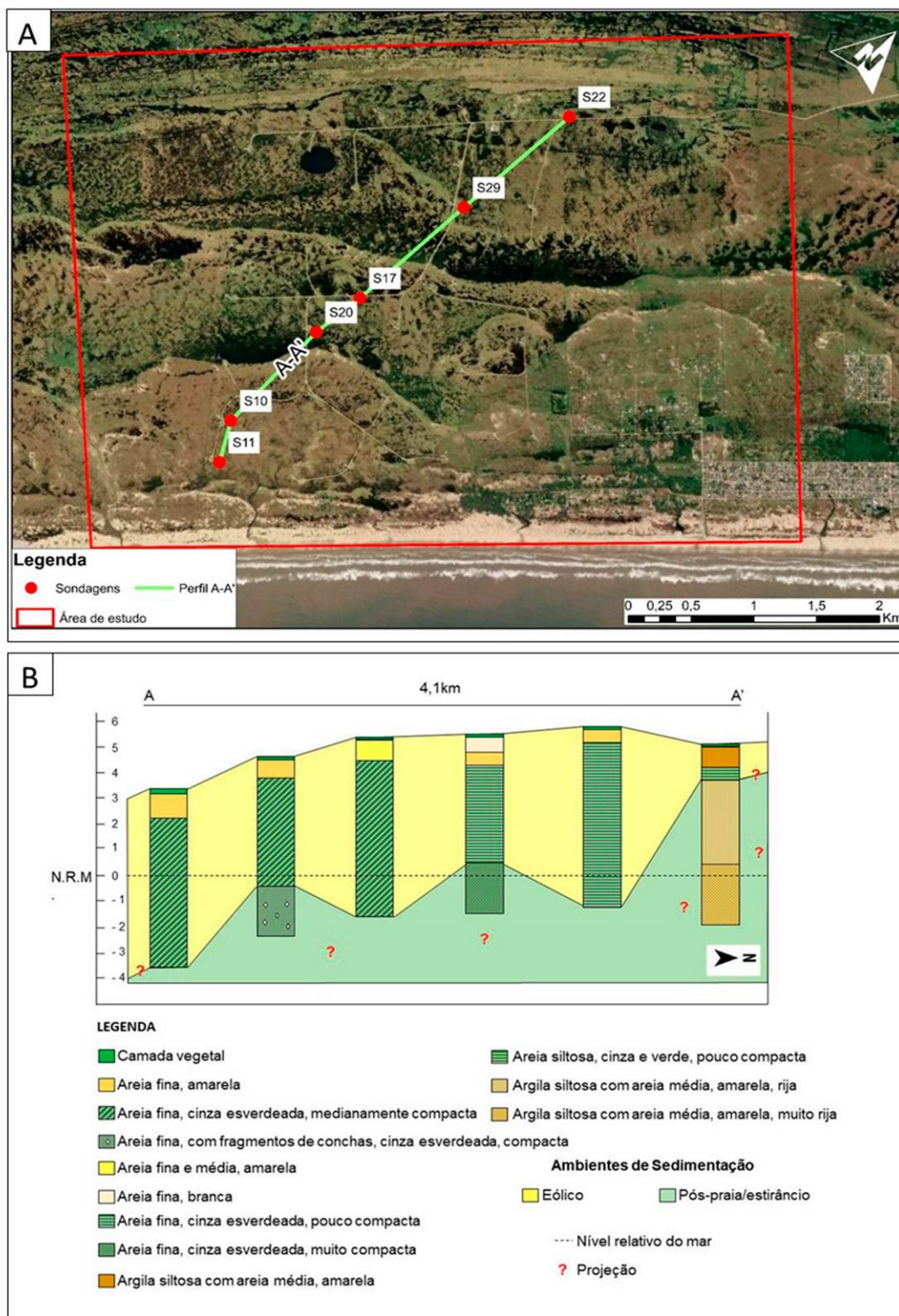


Figura 3. Seção Geológica. A) Localização das sondagens utilizadas na elaboração da seção geológica (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022); B) Seção mostrando a variação textural dos sedimentos e o grau de compacidade para o intervalo analisado.

A partir dessa correlação litoestratigráfica é possível avaliar as diferenças entre as camadas de sedimentos (granulometria e compactidade), bem como sua continuidade lateral. A seção escolhida evidencia a variação textural dos sedimentos e os diferentes níveis de compactação encontrados até a profundidade do intervalo analisado de 7 m.

O reconhecimento do padrão de empilhamento estratigráfico das camadas, as espessuras e a interpretação dos ambientes de sedimentação foram definidos através de um perfil geofísico de GPR. Para esse trabalho foram adquiridas seis linhas de GPR (GPR 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e selecionada apenas uma (GPR 6) levando em consideração ser a mais representativa para o padrão de empilhamento estratigráfico da área.

Para essa interpretação também foi construída uma seção geológica, através das sondagens S01 e S16, a fim de correlacionar lateralmente os perfis litológicos obtidos através das sondagens com o registro da seção de GPR. A Figura 4A apresenta a localização do registro completo e a delimitação da linha processada/interpretada, enquanto a Figura 4B ilustra a seção geológica construída para a correlação lateral entre as duas metodologias.

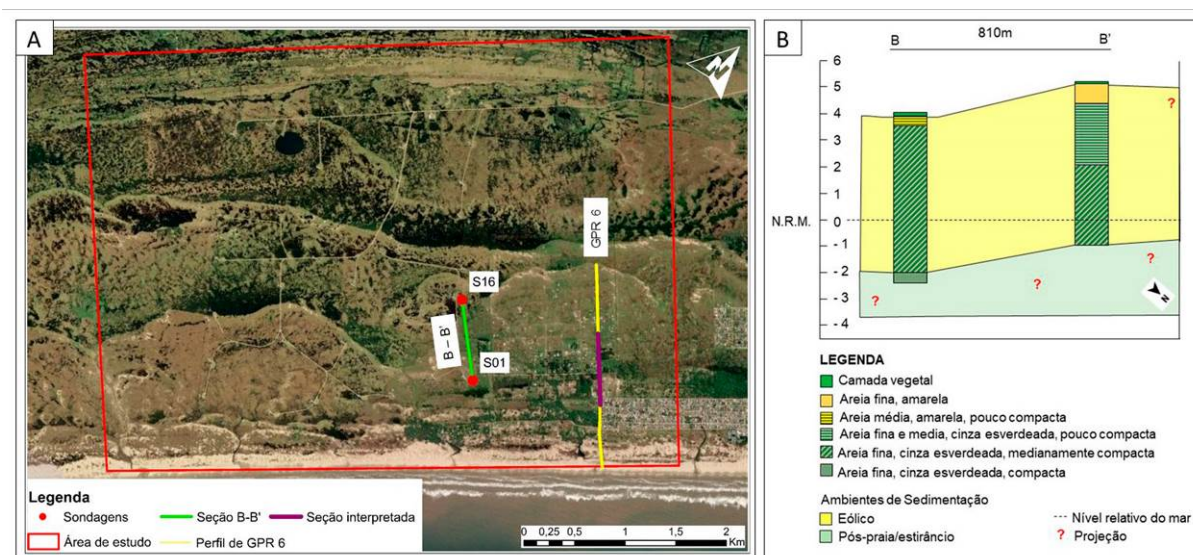


Figura 4. Localização das seções de GPR e geológica. A) Localização das sondagens utilizadas na seção e do perfil geofísico completo vs. perfil processado/ interpretado (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022); B) Seção geológica utilizada na correlação lateral com o perfil de GPR.

Na Figura 5A é apresentado o registro geofísico processado. Já na Figura 5B foram delimitadas cada fácies levando em consideração as terminações de refletores, a geometria e o padrão interno das reflexões. Por fim, a interpretação de cada ambiente é apresentada na Figura 5C.

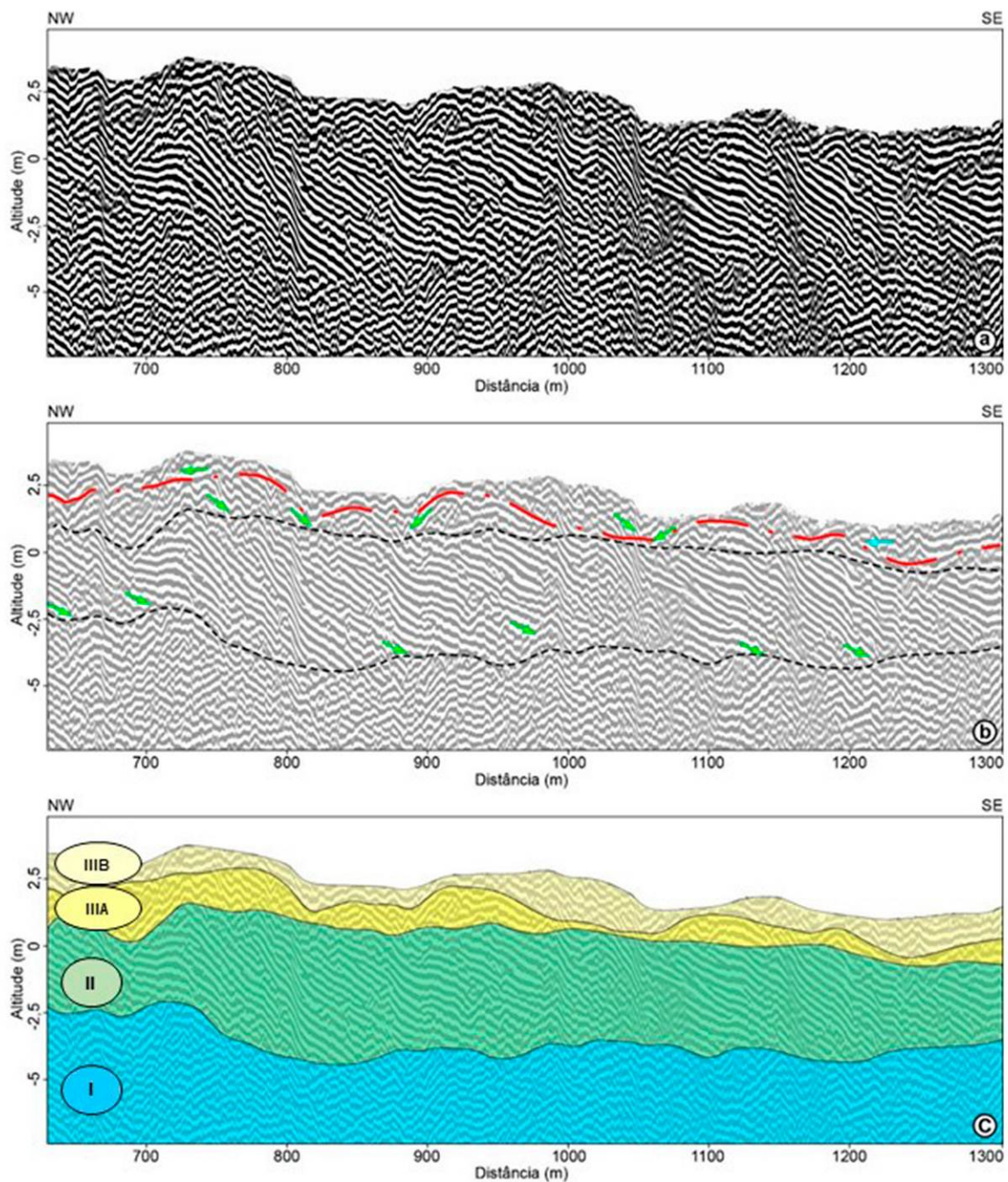


Figura 5. Seção de GPR. A) Registro de GPR processado; B) Identificação das terminações das reflexões e a delimitação das superfícies; C) Interpretação dos ambientes: I – Antepraia Superior; II Pós-praia/estirâncio; IIIA/IIIB Unidade eólica.

A Figura 5 apresenta uma seção de GPR com 700 m de comprimento, partindo do continente (NW) em direção ao oceano (SE). Foram interpretados da base para o topo 3 ambientes: I – Antepraia Superior; II - Pós-praia/estirâncio e a Unidade eólica representada pelas IIIA – Dunas frontais e IIIB - Lençóis de Areias Transgressivos.

A Antepraia Superior foi caracterizada por reflexões onduladas, descontínuas e com um padrão caótico (ambiente de alta energia). O Pós-praia/estirâncio apresenta reflexões contínuas, subparalelas com reflexões com inclinação em direção ao oceano. A terminação das reflexões no limite inferior ocorre em downlap e no limite superior apresenta terminações em toplap. Por fim, a unidade eólica constituída por dunas frontais e lençóis de areias transgressivos, onde as dunas demonstram reflexões ondulados, descontínuos e com terminações de alto ângulo com inclinações ora para o mar, ora para o continente e os lençóis de areias transgressivos, no topo, formados por reflexões horizontais e sub-paralelas.

No mapa altimétrico da área de estudo (Figura 6) é possível observar a topografia relativamente plana da região, com amplitude altimétrica de 3,2 m. A maior altitude na área é observada entre dois pontos que estão localizados na porção central da área, alinhados na orientação de NE para SW. Este alinhamento forma um divisor topográfico sinalizado pelo retângulo em vermelho ilustrado na Figura 6.

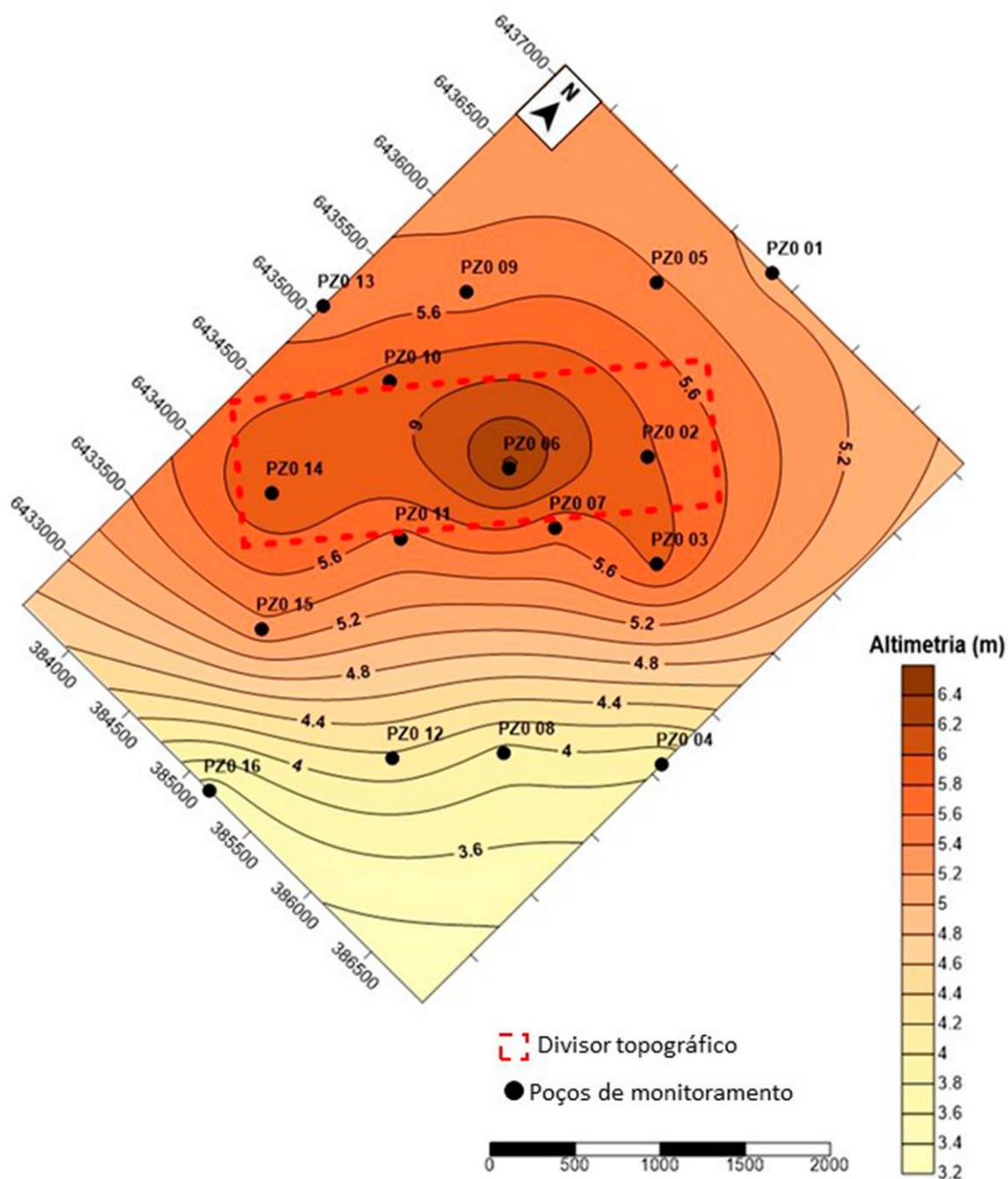


Figura 6. Mapa topográfico obtido com base na integração dos dados das altitudes dos poços.

O alto topográfico é uma condicionante geomorfológica que influencia diretamente nos sentidos de fluxo das águas do lençol freático e é mais bem observada a partir da confecção dos mapas de fluxo apresentados no tópico 4.3.

4.2. Caracterização hidrogeológica da unidade eólica

Para a caracterização hidrogeológica dos depósitos eólicos foram utilizados os dados levantados através das sondagens e da rede de poços de monitoramento. A Tabela 1 e a Figura 7 indicam a localização dos poços.

Tabela 6. Localização e cotas dos poços de monitoramento.

Poços	Coordenadas Geográficas - SIRGAS 2000		Altitudes (m)
	Latitude	Longitude	
PZ0 01	32°11'49.34"S	52°12'59.31"O	5,131
PZ0 02	32°12'30.93"S	52°12'50.39"O	5,818
PZ0 03	32°12'44.32"S	52°12'32.12"O	5,852
PZ0 04	32°13'10.97"S	52°11'59.93"O	3,848
PZ0 05	32°12'5.97"S	52°13'16.26"O	5,413
PZ0 06	32°12'50.87"S	52°13'10.71"O	6,451
PZ0 07	32°12'52.91"S	52°12'54.01"O	5,659
PZ0 08	32°13'30.39"S	52°12'26.93"O	3,934
PZ0 09	32°12'32.48"S	52°13'45.15"O	5,481
PZ0 10	32°12'54.87"S	52°13'43.35"O	5,862
PZ0 11	32°13'14.84"S	52°13'16.95"O	5,541
PZ0 12	32°13'45.88"S	52°12'43.90"O	4,167
PZ0 13	32°12'53.42"S	52°14'5.83"O	5,441
PZ0 14	32°13'25.74"S	52°13'44.68"O	6,004
PZ0 15	32°13'45.61"S	52°13'24.97"O	5,348
PZ0 16	32°14'14.52"S	52°13'8.01"O	3,485

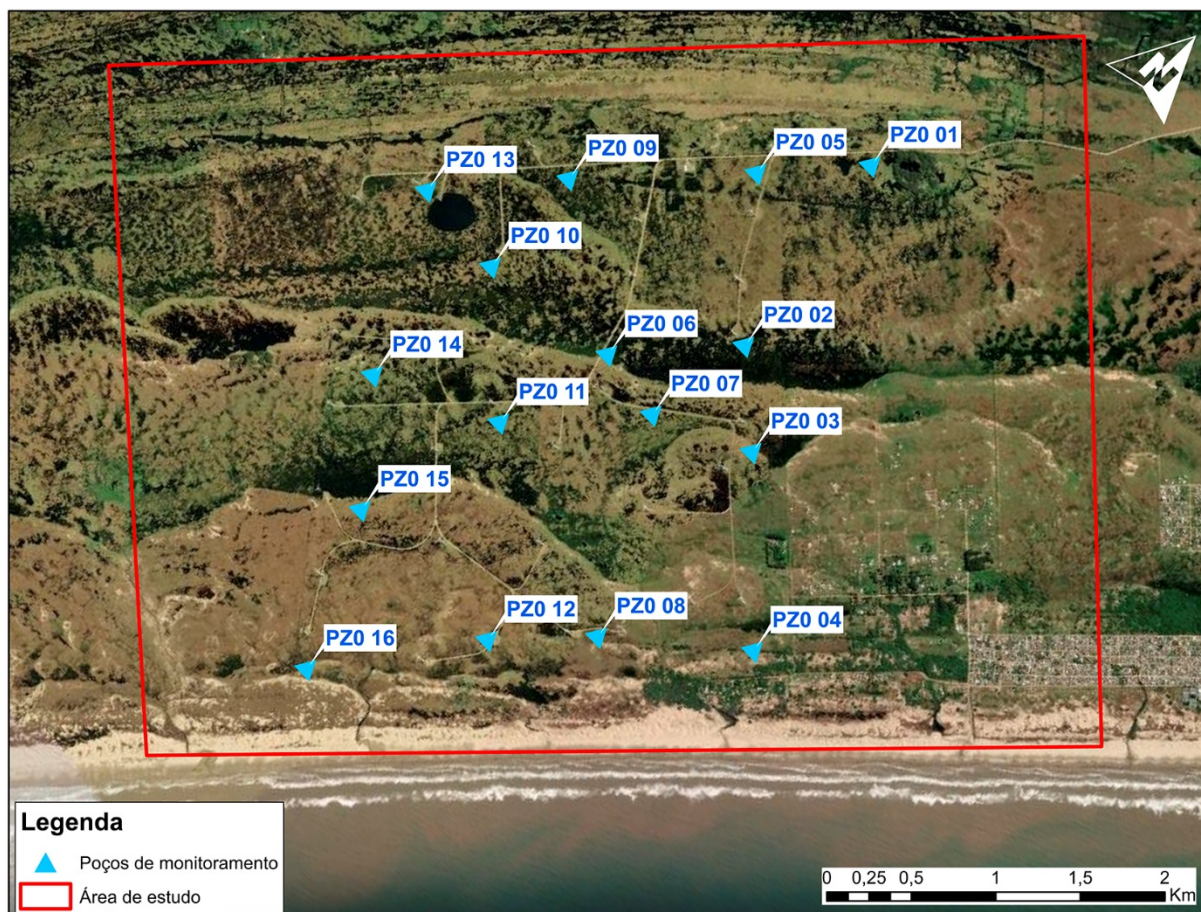


Figura 7. Localização dos poços presentes na área de estudo (imagem de satélite — adaptado de ArcGIS, 2022).

A Figura 8A mostra um perfil construtivo de forma detalhada e adotado para todos os poços da área. Para a construção de um perfil hidrogeológico (Figura 8B) representativo para a área foi utilizado os dados da sondagem S14, cuja altitude é de 5,73 m. Essa sondagem foi escolhida por estar localizada na porção central da área de estudo e inserida geomorfologicamente no local onde ocorrem lençóis de areias transgressivos. Estes lençóis constituem parte dos depósitos presentes na unidade eólica. Para esse perfil foi utilizado o mesmo intervalo definido para as seções geológicas.

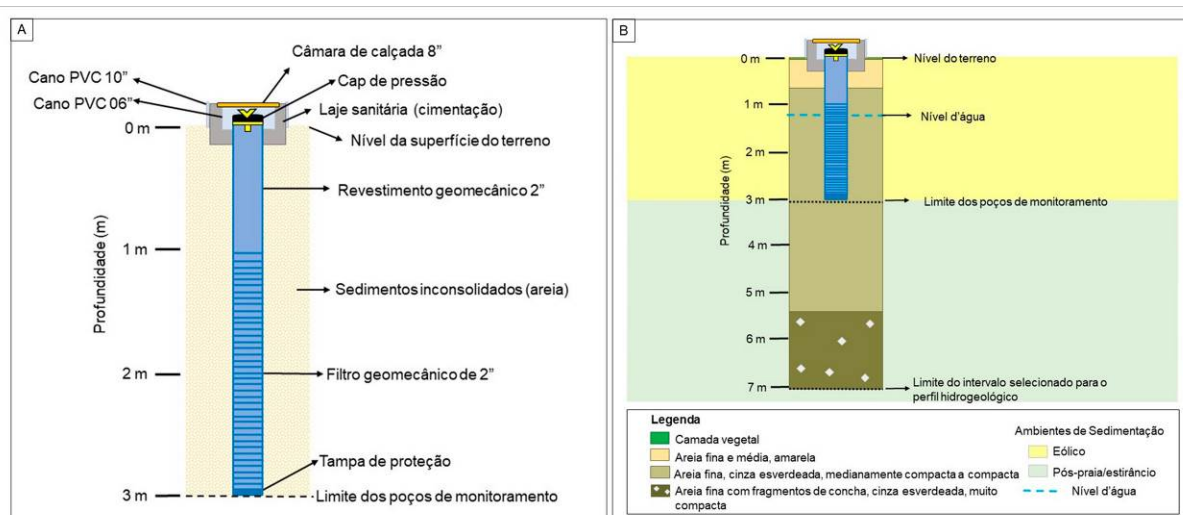


Figura 8. Perfil construtivo e hidrogeológico dos poços. A) Perfil construtivo adotado para todos os poços (elaborado pelo autor); B) Perfil hidrogeológico e construtivo elaborado com base na sondagem S14 e Pzo 11.

A unidade sedimentar é formada por areias de granulometria fina e média, com grau de compactidade que varia de pouco a medianamente compacta. Os níveis d'água (N.A.) dos poços estão localizados muito próximos à superfície do terreno e os dados levantados por meio do monitoramento de 11 meses estão apresentados na Tabela 2. O N.A. mais raso foi identificado no mês de junho, através do poço 11 e apresentou o nível d'água em 0,07 m de profundidade, enquanto que o N.A. mais profundo foi observado no mês de março, através do poço 06 com 1,87 m. Já a menor média de N.A. encontrada entre os poços foi no mês de agosto e a maior em março com valores de 0,293 e 1,323 m de profundidade, respectivamente.

Na Tabela 3 são apresentados os dados obtidos através do INMET para os acumulados mensais de precipitação pluviométrica para os 11 meses de monitoramento dos poços. Os maiores acumulados de precipitação ocorreram entre os meses de fevereiro e julho de 2011 com destaque para o mês de março com 279 mm de precipitação. Os menores acumulados permaneceram entre os meses de outubro de 2010 e janeiro de 2011, com ênfase para outubro onde foi registrado apenas 9 mm para todo o mês.

Tabela 2. Dados de N.A. entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	0,670	0,740	0,990	1,150	1,020	1,290	0,790	0,400	0,310	0,380	0,290
Pzo 02	1,000	1,010	1,210	1,350	1,130	1,330	0,890	0,180	0,180	0,270	0,190
Pzo 03	1,000	1,030	1,250	1,400	1,210	1,430	1,230	0,600	0,570	0,580	0,570
Pzo 04	0,890	0,930	1,250	1,300	1,180	1,330	0,810	0,440	0,430	0,440	0,400
Pzo 05	0,910	0,990	1,200	1,370	1,240	1,430	0,930	0,330	0,250	0,200	0,160
Pzo 06	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740
Pzo 07	1,020	0,970	1,200	1,320	1,140	1,310	0,870	0,220	0,200	0,260	0,200
Pzo 08	0,790	0,970	1,160	1,260	1,100	1,240	0,830	0,420	0,360	0,550	0,300
Pzo 09	1,000	1,050	1,240	1,380	1,270	1,420	0,940	0,260	0,220	0,260	0,220
Pzo 10	0,790	0,890	1,160	1,320	1,220	1,340	0,840	0,230	0,200	0,440	0,210
Pzo 11	0,790	0,780	1,000	1,100	0,960	1,080	0,650	0,120	0,070	0,110	0,090
Pzo 12	1,100	0,800	1,290	1,380	1,240	1,370	0,940	0,570	0,490	0,590	0,450
Pzo 13	0,940	0,960	1,130	1,300	1,170	1,410	0,980	0,630	0,440	0,570	0,490
Pzo 14	0,890	0,910	1,080	1,190	1,000	1,160	0,740	0,260	0,130	0,300	0,170
Pzo 15	0,720	0,770	1,020	1,210	1,110	1,310	0,870	0,210	0,130	0,230	0,100
Pzo 16	0,700	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,130	0,110	0,130	0,100

Tabela 3. Dados pluviométricos (INMET) para o município de Rio Grande.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Precipitação (mm/mês)	9	38	39	31	130	279	97	142	126	36	89

Na comparação entre os acumulados pluviométricos relacionados com as médias mensais dos níveis d'água (Tabela 4), identificou-se que a partir de abril de 2011 os N.A. elevaram-se, diminuindo as médias mensais, principalmente para os meses de maio, junho, julho e agosto de 2011. Tal observação demonstra que a precipitação pluviométrica influenciou diretamente nas elevações dos níveis de água e a estação do ano com temperatura mais baixas retardou esse rebaixamento. Já a média mais alta foi encontrada em março de 2011, demonstrando que a menor recarga do aquífero coincide com a baixa precipitação e com a estação do ano com temperaturas mais altas, contribuindo para o rebaixamento do N.A.

Tabela 4. Dados estatísticos dos níveis de água.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	0,906	0,919	1,165	1,298	1,153	1,323	0,884	0,364	0,301	0,381	0,293
Mínimo	0,670	0,610	0,850	0,940	0,730	0,840	0,450	0,120	0,070	0,110	0,090
Máximo	1,290	1,300	1,610	1,800	1,720	1,870	1,390	0,830	0,730	0,790	0,740

4.3. Avaliação do fluxo de água subterrânea na camada aquífera eólica.

O sentido de fluxo da água subterrânea foi reconhecido a partir das diferenças das cargas hidráulicas do aquífero. Essas cargas (Tabela 5) foram obtidas subtraindo-se as altitudes da boca de cada poço com o seu respectivo nível de água encontrado através do monitoramento mensal.

Tabela 5. Cargas hidráulicas obtidas entre os meses de outubro de 2010 e agosto de 2011.

Poços	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Pzo 01	4,461	4,391	4,141	3,981	4,111	3,841	4,341	4,731	4,821	4,751	4,841
Pzo 02	4,818	4,808	4,608	4,468	4,688	4,488	4,928	5,638	5,638	5,548	5,628
Pzo 03	4,852	4,822	4,602	4,452	4,642	4,422	4,622	5,252	5,282	5,272	5,282
Pzo 04	2,958	2,918	2,598	2,548	2,668	2,518	3,038	3,408	3,418	3,408	3,448
Pzo 05	4,503	4,423	4,213	4,043	4,173	3,983	4,483	5,083	5,163	5,213	5,253
Pzo 06	5,161	5,151	4,841	4,651	4,731	4,581	5,061	5,621	5,721	5,661	5,711
Pzo 07	4,639	4,689	4,459	4,339	4,519	4,349	4,789	5,439	5,459	5,399	5,459
Pzo 08	3,144	2,964	2,774	2,674	2,834	2,694	3,104	3,514	3,574	3,384	3,634
Pzo 09	4,481	4,431	4,241	4,101	4,211	4,061	4,541	5,221	5,261	5,221	5,261
Pzo 10	5,072	4,972	4,702	4,542	4,642	4,522	5,022	5,632	5,662	5,422	5,652
Pzo 11	4,751	4,761	4,541	4,441	4,581	4,461	4,891	5,421	5,471	5,431	5,451
Pzo 12	3,067	3,367	2,877	2,787	2,927	2,797	3,227	3,597	3,677	3,577	3,717
Pzo 13	4,501	4,481	4,311	4,141	4,271	4,031	4,461	4,811	5,001	4,871	4,951
Pzo 14	5,114	5,094	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834
Pzo 15	4,628	4,578	4,328	4,138	4,238	4,038	4,478	5,138	5,218	5,118	5,248
Pzo 16	2,785	2,875	2,635	2,545	2,755	2,645	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385

Nos mapas potenciométricos apresentados na Figura 9 os fluxos encontrados apresentaram dois sentidos preferenciais: noroeste (sentido continente) e sudeste (sentido oceano). Além disso, pode-se identificar que os sentidos de fluxo se mantiveram os mesmos durante todo o período analisado, as únicas variações foram nos valores das cargas hidráulicas (Tabela 6) que aumentaram nos últimos 4 meses de monitoramento. Essa mudança resulta de uma combinação de fatores tais como: elevada precipitação pluviométrica, acúmulo de precipitação de meses anteriores e de temperaturas mais baixas (inverno) fazendo com que a potencimetria seja maior devido ao aumento na recarga do aquífero, enquanto que em meses de menor precipitação e temperaturas mais altas (verão) as cargas diminuiram pela baixa taxa de recarga do aquífero bem como maior processo de evapotranspiração provocado pelo ocorrência de maiores temperaturas.

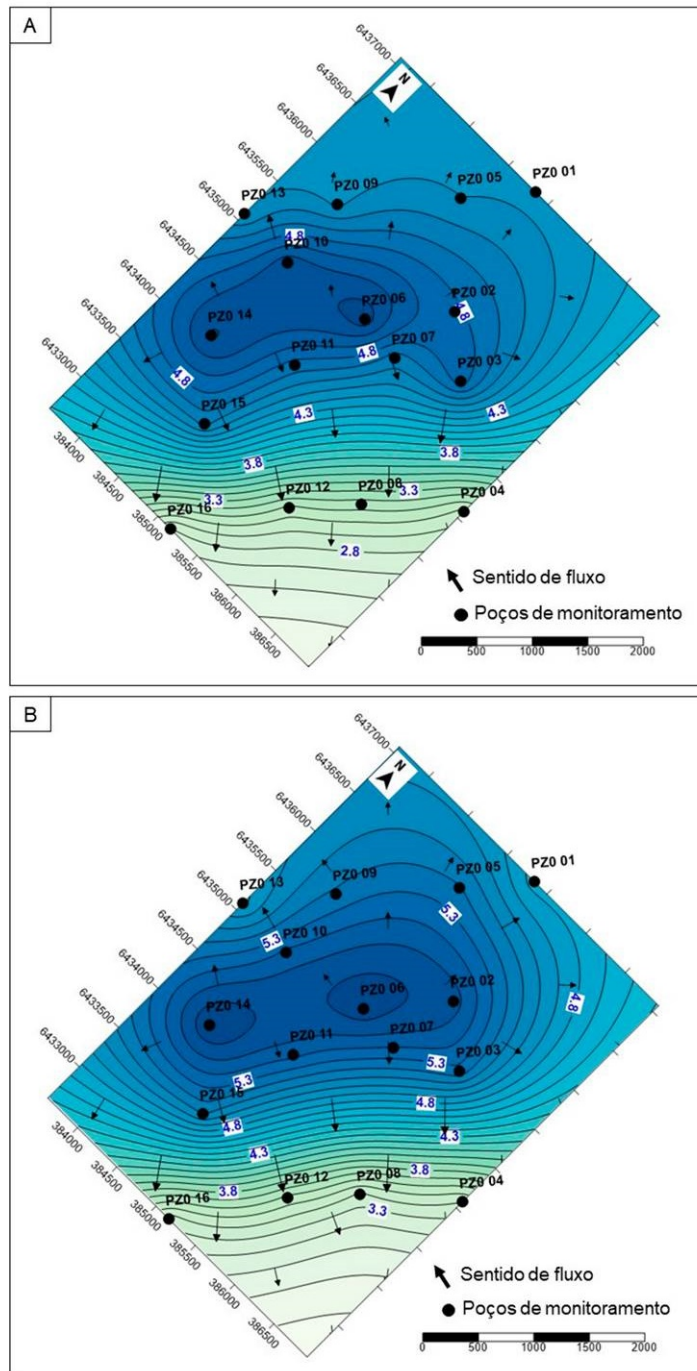


Figura 9. Mapas de fluxo. A) Outubro de 2010; B) Agosto de 2011.

Tabela 6. Dados estatísticos das cargas hidráulicas.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Média	4,308	4,295	4,050	3,917	4,062	3,892	4,330	4,850	4,913	4,833	4,922
Mínimo	2,785	2,875	2,598	2,545	2,668	2,518	3,035	3,355	3,375	3,355	3,385
Máximo	5,161	5,151	4,924	4,814	5,004	4,844	5,264	5,744	5,874	5,704	5,834

A mudança de sentido do fluxo da água subterrânea coincide com o alto topográfico observado através do mapa altimétrico mostrando assim que a topografia da área tem influência nas direções preferenciais de fluxo ao criar um divisor de águas.

Essa mudança pode ocorrer ainda dentro da mesma unidade em função das alterações no grau de compactação ou quando a água encontra outras unidades subsequentes com diferentes características texturais e de compactação como é o caso dos sedimentos que formam a unidade praial. Salienta-se que a água possui capacidade de infiltração mais rápida e melhor percolação entre os sedimentos arenosos, que possuem maior granulometria e nenhum ou baixo grau de compactação. Quando a água infiltra em camadas que possuem material de granulometria mais fina e que estão conseqüentemente mais compactadas, uma “barreira” é criada fazendo que o fluxo de água seja redirecionado para outros locais que apresentem maior porosidade e permeabilidade. Isso já foi observado no estudo realizado por Haitjema e Mitchell-Bruker (2005) que demonstraram que o controle de fluxo da superfície freática, além da topografia, é condicionado pelas taxas de recarga, condutividade hidráulica, transmissividade e extensão do aquífero.

A seção de GPR permitiu observar que a morfologia do terreno bem como a maioria das reflexões mergulha suavemente no sentido do oceano, ambas contribuindo dessa forma para que o sentido de fluxo para aqueles 700 m de distância, ocorra em sentido ao mar.

Na Figura 10 é apresentado um perfil hidrogeológico conceitual que representa os sentidos preferenciais de fluxo da água subterrânea.

7. CONCLUSÕES

A partir desse estudo foi possível identificar que o fluxo de água subterrânea na unidade eólica possui dois sentidos de fluxo preferenciais: noroeste (sentido continente) e sudeste (sentido oceano). Logo o movimento da água subterrânea em aquíferos costeiros que propicia uma circulação regional e preferencial do continente para o oceano pode ser alterado quando realizada uma análise em maior detalhe (local).

Nesse estudo foi verificado que o sentido de fluxo da água subterrânea é alterado nas porções mais elevadas do terreno demonstrando, dessa forma, que a topografia da área tem influência significativa nas mudanças do fluxo ao criar um divisor de águas.

Além disso a unidade eólica possui uma espessura de aproximadamente 3 m e é formada por areias de granulometria muito fina, fina e média, com grau de compactação que varia de pouca a medianamente compacta. Essas características texturais e geotécnicas também contribuem nas mudanças de sentido do fluxo, que

podem ser influenciados ainda dentro de uma mesma unidade em função das alterações no grau de compactação, ou quando a água encontra outras unidades subsequentes com sedimentos de menor granulometria e maior grau de compactação, como é o caso por exemplo, dos sedimentos que compõem a unidade praial.

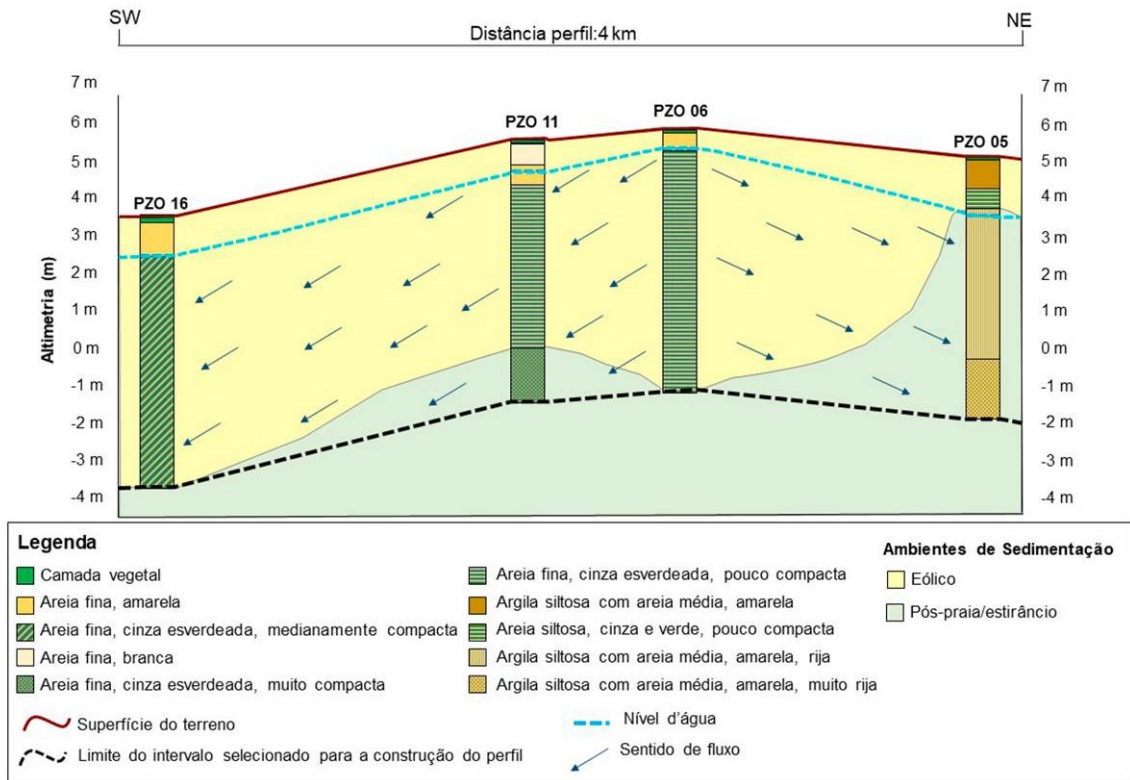


Figura 10. Perfil hidrogeológico conceitual da área de estudo.

A interpretação da seção de GPR permitiu analisar que tanto a morfologia da superfície como as reflexões em subsuperfície mergulham suavemente no sentido do oceano, contribuindo dessa forma para que o sentido de fluxo nesse intervalo interpretado ocorra em sentido sudeste (SE). Partindo dessa constatação, sugere-se que novos trabalhos sejam realizados com interpretações de novos perfis geofísicos de GPR partindo-se do alto topográfico existente na porção central da área em direção ao continente. Essa nova análise poderia identificar se a morfologia da superfície e a geometria das camadas na porção com sentido de fluxo contrário ao oceano possuem inclinação concordante com o fluxo.

Portanto, concluiu-se que a topografia do terreno, as alterações de granulometria e do grau de compactação dos sedimentos e a geometria deposicional das camadas são os principais fatores de influência no sentido de fluxo de água subterrânea para a unidade eólica presente na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- ARCGIS Online. [S. l.], 2022c. Disponível em: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- BARBOZA, E. G.; ROSA M. L. C. C.; CARON, F. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA*, 6., 2014, Porto Alegre. **Resumos expandidos** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014. p. 1-6.
- BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. **Journal of Coastal Research** 2003, SI 35, 260–264.
- BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; RITTER, M. N.; ANGULO, R. J.; BIANCINI DA SILVA, A.; ROSA, M. L. C. C.; CARON, F.; SOUZA, M. C. Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. **Geosciences (Switzerland)** 2021, v. 11, n. 8, 326.
- CHANDRAJITH, R. *et al.* Quantification of groundwater–seawater interaction in a coastal sandy aquifer system: a study from Panama, Sri Lanka. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 72, n. 3, p. 867–877, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-3010-y#citeas>. Acesso em: 2 jun. 2022
- CLEROT, L. C. P. **Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande – RS: evolução e caracterização como reservatório**. 2004. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- CLEROT, L. C. P. *et al.* Estudo da barreira IV na região do Cassino, Rio Grande, RS: evolução e caracterização como reservatório. *In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 15., 2003, Porto Alegre. **Resumos** [...]. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/40184>. Acesso em: 4 jul. 2020.
- DANIELS, J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 195-207, 1995.
- DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. *In: MARTINI, I. P.; WANLESS, H. R. (ed.). Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. London: Geological Society, Special Publications 388, 2014. p. 333–352.
- DILLENBURG, S. R. *et al.* The complex prograded Cassino barrier in southern Brazil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7–6 ka. **Marine Geology**, [s. l.], v. 390, p. 106-119, 2017.
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; HESP, P.A.; ROSA, M.L.C.C. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. SI 64, p. 651-655, 2011.
- HAITJEMA, H. M.; MITCHELL-BRUKER, S. Are water tables a subdued replica of the topography? **Groundwater**, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 781–786, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>. Acesso em: 1 set. 2022.
- HAUSMAN A. Províncias hidrogeológicas do estado do Rio Grande do Sul - RS. **Acta Geológica Leopoldensia: Estudos Tecnológicos**, [s. l.], n. 2, p. 1-27, 1995.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Mapa de estações**, 2013. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- LEANDRO, C. G. *et al.* GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 162, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092698511830065X?via%3Di> hub. Acesso em: 11 nov. 2021.

- MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**: relatório final. Porto Alegre: CPRM, 2005. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5249>. Acesso em: 2 dez. 2020.
- MANOEL FILHO, J. Água Subterrânea em Meios Porosos Homogêneos: Ocorrência das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- MITCHUM JR., R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part six: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *In*: PAYTON, C. E. (org.). **Seismic Stratigraphy**: Applications to Hydrocarbon Exploration. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 117-123.
- NASCIMENTO, E. A. Caracterização hidrogeológica da unidade aquífera barreira holocênica na Região de Cassino, Rio Grande (RS). 2013. 67 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre-RS. 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/95520>
- NBR 7250. **Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos**. 1982. Rio de Janeiro.
- NBR 6484. **Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. 2001. Rio de Janeiro
- NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 66, n. 3–4, p. 261-330, 2004.
- ROCHA, C. M. **Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na Costa Norte do RS (CNRS), Brasil**. 2018. 132 f. Tese (Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/10312>. Acesso em: 4 maio 2020.
- ROCHA, C. M.; ANDRADE, C. F. F.; NIENCHESKI, L. F. H. Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 76–84, 2015. Disponível em: <https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/article/view/6194>. Acesso em: 4 maio 2020.
- ROCHA, C. M.; BARBOZA, E. G.; NIENCHESKI, L. F. H. Radon activity and Submarine Groundwater Discharge in different geological region of a coastal barrier in Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences* 77, 2018. 527.
- VAIL P. R.; MITCHUM JR., R. M.; THOMPSON III, S. Seismic stratigraphy & global changes of sea level: Part three: relative changes of sea level from coastal onlap. *In*: PAYTON, C. E. (org.). **Seismic Stratigraphy**: Applications to Hydrocarbon Exploration. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1977. p. 63-81.
- VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN FILHO, N.O.; BACHI, F.A.; DEHNHARDT, B.A. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. *In*: RABASSA, J. (ed.) **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. A.A. Balkema Publishers, Hungary, 1986. p. 79-94.

ANEXO – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

06/12/2022 15:43

Email – Eliege Alves do Nascimento – Outlook

[RAS] Agradecimento pela submissão

Everton de Oliveira via Sistema Eletrônico de Editoração de Revistas <pen-bounces@emnuvens.com.br>

Ter, 06/12/2022 18:43

Para: Eliege Alves do Nascimento <eliege.an@hotmail.com>

Eliege Alves do Nascimento,

Agradecemos a submissão do trabalho "AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO SISTEMA AQUÍFERO COSTEIRO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DO CASSINO/RS" para a revista Águas Subterrâneas.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/authorDashboard/submission/30202>

Login: eliege

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Everton de Oliveira

[unsubscribe](#)

ANEXO I	
Título da Dissertação:	
“USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLÓGICOS E GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO AQUÍFERO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE CASSINO/RS.”	
Área de Concentração: Geologia Marinha	
Autora: Eliege Alves do Nascimento	
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza Coorientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato	
Examinadora: Profa. Dra. Franciéle Schwanck Carlos	
Data: 28/12/2022	
Conceito: A	
PARECER	
<p>A presente dissertação aborda um tema de grande importância para o entendimento da dinâmica do fluxo de água subterrânea em regiões costeiras. O trabalho apresenta novas contribuições, demonstrando que características locais da região, como por exemplo a topografia, e características hidrogeológicas, como gradiente hidráulico, tem grande influência na direção de fluxo do aquífero. A revisão bibliográfica foi bem desenvolvida, senti falta de um subcapítulo de revisão sobre GPR, mas no geral o capítulo é objetivo e claro. A metodologia escolhida consegue atingir os objetivos propostos e fornece resultados importantes para o desenvolvimento do estudo. Os resultados estão bem descritos e interpretados. As figuras geradas ajudam na interpretação dos resultados obtidos, são objetivas e bem detalhadas. De maneira geral, são resultados novos que podem contribuir no entendimento da circulação da água subterrânea em regiões costeiras, bem como na compreensão dos mecanismos que controlam o fluxo nessas regiões, esse conhecimento é de vital importância para a gestão dos recursos hídricos em áreas que muitas vezes são densamente povoadas e extremamente vulneráveis.</p>	
Assinatura:	Data: 28/12/2022
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I
Título da Dissertação:
“USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLÓGICOS E GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO AQUÍFERO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE CASSINO/RS.”
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autora: Eliege Alves do Nascimento
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza Coorientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato
Examinador: Prof. Dr. Felipe Caron
Data: 16/01/2023
Conceito: (B) Bom
PARECER:
<p>A dissertação avaliada apresenta uma importante contribuição ao estudo da caracterização hidrogeológica no fluxo de águas subterrânea no aquífero associado aos depósitos holocênicos. A avaliação da presente <i>Dissertação foi realizada com base em dois aspectos: o da forma e o de conteúdo</i>: Quanto à <i>forma</i>, se encontra em um padrão geral de dissertação, contendo: i) texto integrador: a) introdução com a formulação do problema de investigação e a hipótese; b) objetivos da pesquisa; c) estado da arte do tema da pesquisa; d) caracterização da área de estudo; e) materiais e métodos utilizados; f) resumo dos principais resultados obtidos e discussão integradora dos resultados; g) conclusões; h) referências bibliográficas. ii) artigo: (submetido a Revista Águas Subterrâneas) “Avaliação do fluxo da água subterrânea do aquífero associado aos depósitos eólicos holocênicos na região do Cassino/RS”. Como sugestão quanto à forma geral da dissertação seria apresentar após o artigo submetido os itens: f) resumo dos principais resultados obtidos e discussão integradora dos resultados; g) conclusões e h) referências bibliográficas. Teria mais coerência com as normas do PPGGEO-UFRGS. Os itens 3 e 4 poderiam ser melhor organizados, pois ocorrem sobreposições quanto ao conteúdo. A forma do artigo é adequada e com boa organização. Quanto à forma em geral das figuras, apresentam-se visíveis e com boa resolução, sem deformações. Raros casos são de não distinção de elementos pelo tamanho da fonte e/ou desenhos. As legendas das figuras são explicativas, com raras exceções à falta de informação. O texto está formatado de modo adequado e ordenado com as figuras. De modo geral quanto ao <i>conteúdo</i> apresentado na dissertação, possui referências que vão de encontro ao assunto abordado, no entanto em alguns momentos importantes, estão ausentes. Os objetivos e a problemática são apresentados e os resultados e discussões estão em consonância com que é proposto no artigo. Considero a repetição de figuras (idênticas) e textos da primeira e da segunda parte do corpo da dissertação desnecessárias, deveriam ser complementares. Aspectos mais específicos quanto ao conteúdo serão abordados na forma de sugestões dentro de cada item e/ou figura específica, na ordem do texto: O item 3.3 em muitos parágrafos falta referências bibliográficas. O item 3.4 poderia ter sido explorado de forma mais investigativa em relação ao uso do GPR em Hidrogeologia. A figura 3 da primeira parte e figura 1 do artigo, item 4.1 inserir: Oceano Atlântico. Itens 4.2 faltam a complementação de importantes referências mais recentes, pois neste , evoluiu bastante na última década. No Item 6.1, figura 9, não compreendo como pode haver depósitos eólicos a 4 metros abaixo do nível relativo do mar a uma distância de cerca de 500 m da linha de costa atual, revisar a seção. Da mesma forma a figura 10, no mesmo item, que ilustra depósitos eólicos a 2 metros abaixo do nível relativo do mar também a cerca de 500 m da linha de costa atual. A seção de GPR apresentada ilustra com clareza as unidades eólicas sempre acima do nível relativo médio do mar e é paralela a seção geológica, portanto, se faz necessária correlação e reinterpretação. Segundo a</p>

figura 13, a orientação do perfil é N-S e não NE-SW como ilustrado no perfil da figura 23. Revisar a interpretação entre os dados das sondagens e os dos piezômetros. Novamente na figura 23 os depósitos eólicos se apresentam a cerca de 4 metros abaixo no nível relativo do mar atual, muito próximo a linha de costa atual (a cerca de 500 m), revisar. Os efeitos dos fluxos podem não ser modificados, mas acredito que para os poços avaliados mais próximos a linha de costa atual, a unidade praial também foi considerada nos resultados e não somente a eólica. As conclusões devem refletir os resultados: a seção de GPR a unidade eólica tem em média cerca de 3 m, mas isso não reflete nas seções geológicas onde se encontram valores de até 7 m, portanto devem ser reavaliadas. Considerações do artigo: O abstract necessita ser revisado o inglês. A segunda metade do segundo parágrafo da introdução deve ser acompanhada de referências. Quanto aos objetivos e metodologia estão claros. O item 4 do artigo "Resultados e Discussões", podem melhorar. Pelo grande volume de dados seguem algumas sugestões: i) apresentar e definir através de dados pretéritos (os que os próprios autores citam que foram consultados) o limite e espessuras dos depósitos eólicos e os depósitos praias. Os dados pretéritos bem como as seções de GPR estão com interpretações distintas, portanto devem ser justificadas e/ou corrigidas, principalmente as espessuras quanto aos depósitos eólicos. As figuras 3B e 4B mostram diferenças significativas em relação à figura 5C como já apontado no item 6 da primeira parte da dissertação. ii) Para os resultados hidrogeológicos revisar as espessuras apresentadas nas figuras 3B e 4B, como parte apenas de depósitos eólicos, pois isso afetará diretamente na interpretação dos fluxos considerados "apenas" nesta unidade. Os resultados hidrogeológicos refletem bem a influência da pluviosidade e da topografia, isso é muito bem ilustrado nas figuras 6 e 9 e no texto. Como sugestão seria complementar o texto com referências de trabalhos e corroboram ou não com os resultados obtidos, estabelecendo uma discussão dos pontos mais importantes como: pluviosidade X níveis de água, a questão da topografia, a relação e as diferenças entre a compactação de depósitos eólicos e praias, por exemplo. As conclusões estão de acordo com os dados obtidos, no entanto revisar a figura 10. Utilizando dados de alta resolução, inéditos e de boa qualidade, principalmente sobre os aspectos, geológico-geofísicos e hidrológicos, o presente trabalho contribui na caracterização hidrogeológica de aquíferos costeiros com enfoque em barreiras costeiras holocênicas.

Assinatura:



Data: 16/01/2023

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação:
“USO DE DADOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLÓGICOS E GEOFÍSICOS (GPR) NA AVALIAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO AQUÍFERO ASSOCIADO AOS DEPÓSITOS EÓLICOS HOLOCÊNICOS NA REGIÃO DE CASSINO/RS.”
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autora: Eliege Alves do Nascimento
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza Coorientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato
Examinador: Prof. Dr. Marcos Alexandre de Freitas
Data: 15/01/2023
Conceito: A (Excelente)
PARECER:
<p>O tema abordado pela autora é de alta relevância acadêmica e técnica, pois os aquíferos litorâneos são pouco estudados e possuem fundamental importância na exploração das águas subterrâneas, bem como na questão ambiental (interação com águas superficiais, por vezes dando origem às lagoas e banhados).</p> <p>A dissertação apresenta redação clara e objetiva com uma extensa e consistente revisão bibliográfica que atende à temática abordada. A autora abordou muito bem a problemática do assunto e cumpriu os objetivos propostos. Cabe ainda destacar o tratamento e interpretação da boa quantidade de dados de poços de monitoramento e de levantamento de georadar apresentados.</p> <p>O artigo submetido relacionado à dissertação foi encaminhado para um tradicional e bem-conceituado periódico, com grande chance de ser aceito e publicado.</p> <p>Resumindo, trata-se de um trabalho de muito boa qualidade e que traz relevantes contribuições para o assunto na região do litoral sul rio-grandense e em outras regiões com características semelhantes. Assim, considero que a dissertação preenche todos os requisitos e é merecedora do conceito A (Excelente).</p> <p>Algumas recomendações para pesquisas futuras fazem-se necessárias como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abordar os parâmetros hidrodinâmicos (K, T e S) do aquífero estudado através de slug-test nos vários poços de monitoramento e de dados de poços tubulares existentes na região; • Avaliar as características físico-químicas das águas através de medidas <i>in loco</i> de pH, Eh e condutividade elétrica e comparar com as linhas de fluxo; • Estimar a recarga do aquífero na área a partir de um estudo de balanço hídrico e comparar com as variações nas cargas hidráulicas; • Incorporar ao estudo mais métodos geofísicos elétricos como caminhamento elétrico e SEV, além de mais seções de georadar.

Aproveito para cumprimentar a autora, orientador e co-orientador pela qualidade alcançada na dissertação e no artigo submetido.

Assinatura:



Data: 15/01/2023

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: