

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BIANCA MARCELINO VOLPATO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE EM AQUÍFEROS COSTEIROS A PARTIR
DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO NO LITORAL NORTE DO RS**

**Caçapava do Sul
2025**

BIANCA MARCELINO VOLPATO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE EM AQUÍFEROS COSTEIROS A PARTIR
DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO NO LITORAL NORTE DO RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Fries

Coorientadora: Dra. Mariah Xavier Rocha

**Caçapava do Sul
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

V931a Volpato, Bianca Marcelino

Avaliação da vulnerabilidade em aquíferos costeiros a partir de análise multicritério no litoral norte do RS / Bianca Marcelino Volpato.

93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

"Orientação: Maximilian Fries".

1. Água subterrânea. 2. Hidrogeologia. 3. DRASTIC. 4. GOD. 5. Planície Costeira do Rio Grande do Sul. I. Título.

BIANCA MARCELINO VOLPATO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE EM AQUÍFEROS COSTEIROS PARTIR DE
ANÁLISE MULTICRITÉRIO NO LITORAL NORTE DO RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: dia, mês e ano.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin
UNIPAMPA

Geól. Me. Luísa Collischonn
UFRGS



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 13:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MATIAS FELTRIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1933016** e o código CRC **011CC135**.

Dedico esta conquista à minha mãe, meu pai e familiares cujo apoio foi a luz que me guiou em todos os momentos.

E em singela homenagem à minha avó Florentina e ao meu avô Levino, que, de onde estiverem, celebram comigo este dia tão especial.

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho foi possível graças ao apoio e contribuição de diversas pessoas e à instituição, às quais expresso minha sincera gratidão. Agradeço à minha família pelo apoio incondicional. Em especial, à minha mãe, figura fundamental em toda esta jornada, e ao meu pai. Também aos amigos que acompanharam esta trajetória, pela amizade, cumplicidade e pelos momentos compartilhados. Vocês tornaram este percurso mais leve e feliz. Agradeço de forma especial à Ariely, Kallema e Monara, que me ajudaram como puderam, vocês foram de extrema importância para a conclusão desta etapa.

Sou grata à UNIPAMPA pela oportunidade de vivenciar uma formação acadêmica tão transformadora. Agradeço a todos os professores, técnicos e funcionários que, com seu trabalho diário, constroem e desenvolvem esta Universidade promovendo a inclusão, equidade e diversidade. Um agradecimento especial ao pessoal do NuDE, Katiucia, Liara, Leila e Bruno, cuja contribuição foi tão valiosa para a minha formação.

Agradeço ao orientador, Maxmilian Fries pela ajuda e contribuições fornecidas, pela paciência nas orientações, e por acreditar no potencial deste trabalho. Também registro minha profunda gratidão à Mariah Xavier Rocha, cuja orientação foi fundamental para a concepção e o desenvolvimento conceitual da presente pesquisa.

Gostaria agradecer à Luísa Collischonn, cujas contribuições como membro da banca enriqueceram imensamente este trabalho desde a versão final, e ao Rafael Matias Feltrin, pela disponibilidade como membro da banca. Agradeço ao Geólogo Maiquel Kochhann Lunkes pela disponibilização dos dados de poços, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim agradeço a todas as pessoas especiais que conheci ao longo desta jornada, tanto na UNIPAMPA quanto em Caçapava do Sul, e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram e que não foram mencionados nominalmente. A cada um, meu sincero obrigado.

“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo.”

F. Scott Fitzgerald

RESUMO

O litoral norte do Rio Grande do Sul apresenta um cenário complexo em relação à gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A crescente pressão antrópica, caracterizada pela expansão urbana, atividades agrícolas intensivas e turismo, aliada às mudanças climáticas, expõe os aquíferos costeiros a um risco cada vez maior à contaminação e degradação. O Sistema Aquífero Costeiro constitui a principal fonte de abastecimento da região. Este estudo tem como objetivo principal avaliar a vulnerabilidade natural desses aquíferos à contaminação, com foco na região costeira dos municípios de Cidreira, Imbé, Osório, Tramandaí e Xangri-Lá. Para tanto, uma análise multicritério, por meio de abordagem híbrida baseada nos métodos DRASTIC e o GOD, que integram diversos critérios hidrogeológicos, geológicos e pedológicos, foi aplicada em ambiente SIG. A Planície Costeira do Rio Grande do Sul tem sua evolução geológica influenciada por múltiplos ciclos de transgressões e regressões marinhas, tendo formado uma sequência de sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, os quais condicionam a hidrogeologia local. A heterogeneidade dos sistemas deposicionais, caracterizados por alternância de camadas argilosas e arenosas exercem controle sobre a permeabilidade e porosidade das formações, afetando diretamente a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação. O estudo comparativo entre os aquíferos livre e semiconfinado, demonstrou que o aquífero livre com índice de vulnerabilidade de 0,616 a 0,749 resultou na predominância de vulnerabilidade extrema (82,28% da área), associada à menor profundidade do nível freático e solos permeáveis. Em contraste, o aquífero semiconfinado apresentou índices de 0,6 a 0,734 com prevalência de vulnerabilidade alta (83,63%), devido ao efeito atenuante da camada confinante e à maior profundidade do sistema. A análise espacial dos critérios revelou maior heterogeneidade em parâmetros relacionados à cobertura e ao aquífero, enquanto outros se mostraram regionalmente uniformes.

Palavras-Chave: Água subterrânea; Hidrogeologia; DRASTIC; GOD; Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

The northern coast of Rio Grande do Sul presents a complex scenario regarding the management of groundwater resources. Increasing anthropogenic pressure, characterized by urban expansion, intensive agricultural activities, and tourism, combined with climate change, exposes coastal aquifers to growing risks of contamination and degradation. The Coastal Aquifer System constitutes the main water supply source for the region. This study aims to evaluate the natural vulnerability of these aquifers to contamination, focusing on the coastal region of the municipalities of Cidreira, Imbé, Osório, Tramandaí, and Xangri-Lá. To achieve this, a multicriteria analysis, through a hybrid approach based on the DRASTIC and GOD methods integrating various hydrogeological, geological, and pedological criteria, was applied in a GIS environment. The Coastal Plain of Rio Grande do Sul has its geological evolution influenced by multiple cycles of marine transgressions and regressions, resulting in a sequence of lagoon-barrier depositional systems that condition the local hydrogeology. The heterogeneity of these depositional systems, characterized by alternating clayey and sandy layers, controls the permeability and porosity of the formations, directly affecting the natural vulnerability of the aquifers to contamination. The comparative study between the unconfined and semi-confined aquifers demonstrated that the unconfined aquifer, with a vulnerability index ranging from 0.616 to 0.749, resulted in the predominance of extreme vulnerability (82.28% of the area), associated with shallower water tables and permeable soils. In contrast, the semi-confined aquifer showed indices from 0.6 to 0.734, with a prevalence of high vulnerability (83.63%), due to the attenuating effect of the confining layer and the greater depth of the system. The spatial analysis of the criteria revealed greater heterogeneity in parameters related to cover and aquifer properties, while others were regionally uniform.

Keywords: Groundwater; Hydrogeology; DRASTIC; GOD; Rio Grande do Sul Coastal Plain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo no perímetro estadual (A); com imagem satélite (B) e sistema viário urbano (C)	18
Figura 2: Modelo tectônico do estágio da abertura do Atlântico Sul.	19
Figura 3: Principais compartimentações geológicas do RS, sendo as áreas fonte de sedimentos da Planície Costeira as rochas do Escudo Sul Rio-grandense e da Bacia do Paraná	20
Figura 4: Mapa Geológico da PCRS	21
Figura 5: Perfil esquemático dos sistemas deposicionais que compõem a PCRS ...	23
Figura 6: Localização da área de estudo no RS (A). Mapa geológico da área de estudo (B)	24
Figura 7: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí	25
Figura 8: Mapa de Uso e cobertura da Terra no ano de 2024	27
Figura 9: Modelo hidrogeológico simplificado de um aquífero costeiro	29
Figura 10: Recorte do Mapa Hidrogeológico do RS. Os números acompanhados das unidades hidroestratigráficas representam a profundidade em metros do topo do aquífero, onde Q = Quaternário; SG = Serra Geral; Bot = Formação Botucatu. A porção aproximada da área de estudo está situada sobre o qc1 (Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I) de produtividade aquífera alta e qc2 (Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II) de produtividade aquífera muito baixa	31
Figura 11: Representação gráfica da arquitetura geológica do pacote sedimentar do SAC	33
Figura 12: Bloco de diagrama esquemático do modelo conceitual, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas no litoral norte da PCRS, abrangendo os municípios de Tramandaí, Imbé e Osório	33
Figura 13: Esquema explicativo de intrusão salina onde no primeiro quadro (A) representa uma situação em equilíbrio e no segundo quadro (B) representa a intrusão salina	35
Figura 14: Esquema simplificado do método GOD	37
Figura 15: Critérios e índices do método GOD com os valores atribuídos para a classificação da vulnerabilidade	39
Figura 16: Esquema simplificado do método DRASTIC	40

Figura 17: Critérios e índices do método DRASTIC com os valores atribuídos, exemplo de aplicação ao Sistema Aquífero Guarani realizado pela CPRM	42
Figura 18: Intervalos de valores e classificação correspondente	43
Figura 19: Mapa da vulnerabilidade do aquífero livre obtido da região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS	44
Figura 20: Mapa da vulnerabilidade do aquífero semiconfinado/confinado obtido da região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS	45
Figura 21: Mapas dos critérios do GOD no município de Palmares do Sul/RS. (A) Critério G; (B) Critério O; (C) Critério D; (D) Vulnerabilidade natural resultante para o aquífero livre	46
Figura 22: Mapas dos critérios do GOD no município de Palmares do Sul/RS. (A) Critério G; (B) Critério O; (C) Critério D; (D) Vulnerabilidade natural resultante para o aquífero confinado	47
Figura 23: Mapa de análise normalizada da vulnerabilidade ambiental no litoral norte do RS	48
Figura 24: Mapas de localização dos poços distribuídos para a) aquífero livre; b) aquífero semiconfinado	50
Figura 25: Representação esquemática fora de escala dos critérios do método GODASI	51
Figura 26: Método GODASI para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos quaternários ou sedimentares	52
Figura 27: Classes de vulnerabilidade em termos de significância	53
Figura 28: Configurações principais do interpolador IDW no QGIS®	55
Figura 29: Calculadora raster no software QGIS®	57
Figura 30: Mapas interpolados de cada critério (GODASI) para o aquífero livre (A) G - Tipo de aquífero; (B) O – Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A – Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I – Material da zona não-saturada	59
Figura 31: Mapas interpolados de cada critério (GODASI) para o aquífero semiconfinado (A) G - Tipo de aquífero; (B) O – Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A – Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada	60
Figura 32: Mapas reclassificados (GODASI) para o aquífero livre (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A -	

Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada	61
Figura 33: Mapas reclassificados para o aquífero semiconfinado (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A - Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada	62
Figura 34: Resultados da aplicação GODASI com os pesos utilizados, recalculados e os índices de vulnerabilidade obtidos para os dois sistemas aquíferos estudados ...	63
Figura 35: Mapa de vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero livre (A) e aquífero semiconfinado (B)	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP - Analytic Hierarchy Process

BHRT - Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí

Cfa - Clima subtropical úmido

CORSAN - Companhia Rio-grandense de Saneamento,

DRASTIC - Depth to groundwater, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the vadose zone, Conductivity hydraulic

EPSCG - European Petroleum Survey Group

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental

GOD - Groundwater hydraulic confinement

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverse Distance Weighting

MDT - Modelo Digital de Terreno

PCRS - Planície Costeira do Rio Grande do Sul

POSH - Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically

RS - Rio Grande do Sul

SAC - Sistema Aquífero Costeiro

SAQC - Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

SGB/CPRM - Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIRGAS - Sistema de Referência Geodésico para as Américas

SRC - Sistema de Referência de Coordenadas

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UH - Unidade Hidrográfica

UTM - Universal Transverse Mercator

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	JUSTIFICATIVA	17
4	ÁREA DE ESTUDO	18
4.1	Localização	18
4.2	Contexto Geológico	18
4.3	Clima e Hidrografia	24
4.4	Uso e cobertura da Terra	26
5	ESTADO DA ARTE	28
5.1	Sistemas Aquíferos Costeiros da PCRS	29
5.2	Vulnerabilidade de Aquíferos Costeiros	34
5.3	Análise Multicritério aplicada à Vulnerabilidade de Aquíferos	36
5.3.1	Método GOD	36
5.3.2	Método DRASTIC	39
5.3.3	Análise de Vulnerabilidade do SAC no Litoral Norte da PCRS	43
6	METODOLOGIA GODASI	49
6.1	Mapas Temáticos	53
6.2	Reclassificação de Mapas Temáticos	55
6.3	Mapa de Vulnerabilidade	56
7	RESULTADOS	58
8	DISCUSSÕES	65
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXOS	74

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um recurso hídrico essencial, especialmente em regiões onde a água superficial é escassa ou de baixa qualidade, sendo utilizada para o abastecimento doméstico, industrial e agrícola. No entanto, observa-se que a gestão de águas subterrâneas é mais lenta se comparada à gestão de águas superficiais. A escassez e a vulnerabilidade das águas subterrâneas são aspectos que devem ser abordados com mais atenção. A vulnerabilidade natural de um aquífero pode ser entendida como a suscetibilidade do mesmo em ser mais ou menos afetado por contaminação (Pedrosa *et al.*, 2019), prejudicando a qualidade da água subterrânea de forma a impactar a viabilidade do seu uso, bem como produzir danos ecossistêmicos e sanitários. Nas regiões litorâneas, como a área de estudo, a crescente pressão antrópica somadas aos efeitos das alterações climáticas podem gerar maiores riscos aos aquíferos costeiros, intensificando a contaminação por poluentes e facilitando a intrusão salina devido à superexploração das águas subterrâneas.

De acordo com Falheiros (2019), o crescimento da conscientização nacional sobre a conservação de águas subterrâneas tornou as avaliações de vulnerabilidade mais proeminentes, abordagem esta que é fundamental na identificação de zonas com risco de contaminação. Nesse contexto, as análises multicritério aliadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), têm sido amplamente aplicados para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos, utilizando um conjunto de fatores geológicos e hidrogeológicos hierarquizados de acordo com sua importância local. A aplicação desses métodos permite uma análise detalhada da vulnerabilidade com a identificação de áreas críticas. A abordagem multicritério no ambiente SIG tem como principal vantagem a capacidade de integração de dados para fins de mapeamento temático, auxiliando a tomada de decisão para medidas estratégicas de gestão e conservação dos aquíferos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros no litoral norte do Rio Grande do Sul (RS), nos municípios de Cidreira, Imbé, Osório, Tramandaí e Xangri-Lá, a partir de uma análise multicritério em ambiente SIG, considerando fatores naturais.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos consistem em:

- I. Identificar os critérios geológicos locais que contribuem para a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros do litoral norte do RS a partir de metodologias bem estabelecidas na literatura e de dados disponíveis.
- II. Produzir mapeamentos temáticos a partir de uma base de dados de sensoriamento remoto e dados de poços da região.

3 JUSTIFICATIVA

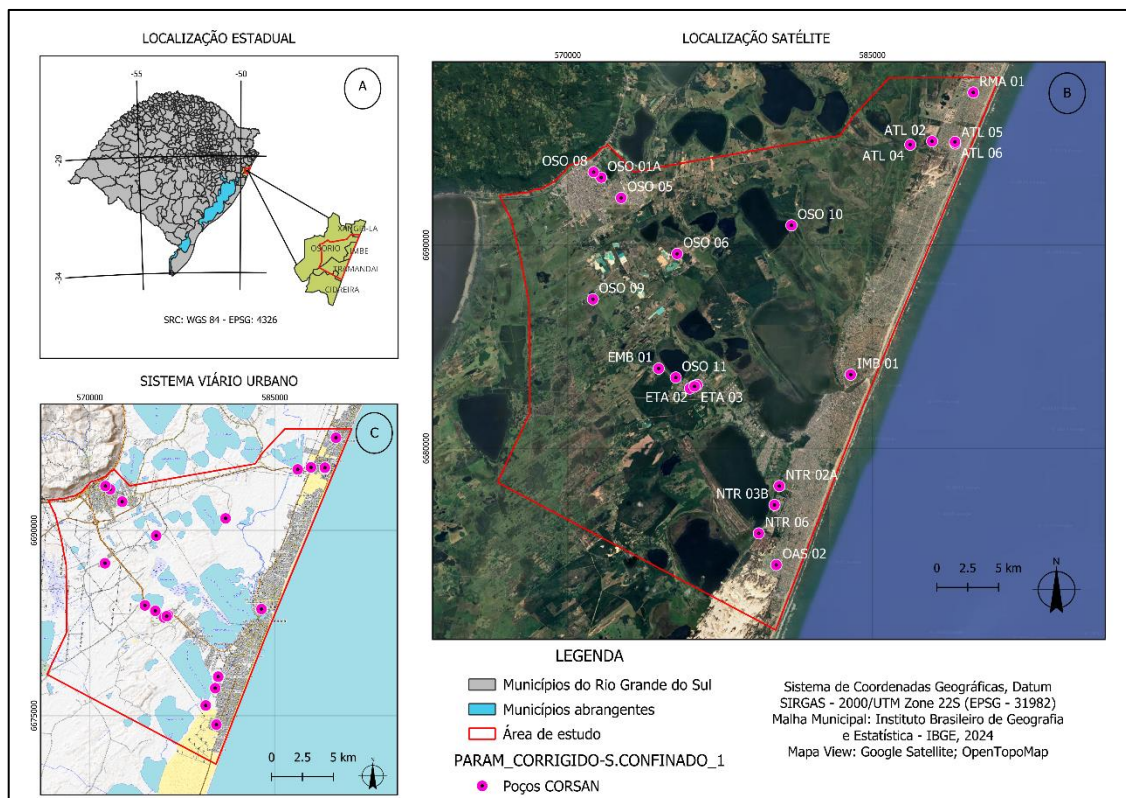
Os aquíferos das regiões costeiras do Rio Grande do Sul podem apresentar grande vulnerabilidade natural em razão de serem constituídos por sedimentos inconsolidados do período Quaternário, ou até anteriores (Collischonn, 2018; Troian *et al*, 2020; Troian, 2021). O litoral norte é a porção que concentra o maior adensamento urbano e segue em crescimento acelerado, produzindo uma série de potenciais contaminantes resultantes das formas de uso e ocupação. A falta de gestão de saneamento básico e novos projetos de emissão de efluentes sobre os sistemas lagunares da região colocam em risco a qualidade das águas superficiais e dos aquíferos. Desta forma, esforços para identificar o grau de vulnerabilidade desses aquíferos costeiros podem contribuir como subsídio para os instrumentos de gestão costeira integrada.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A área de estudo (Figura 1) possui aproximadamente 1.080 km² e uma extensão de 60 km de faixa litorânea, na porção norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), a qual representa um importante domínio geomorfológico. Situa-se entre os paralelos 29°S e 30°S e os meridianos 50°W e 51°W, compreendendo os municípios de Cidreira, Imbé, Osório, Tramandaí e Xangri-Lá, a cerca de 120 km de Porto Alegre.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo no perímetro estadual (A); com imagem satélite (B) e sistema viário urbano (C).



Fonte: Elaborado pela autora no software QGIS®.

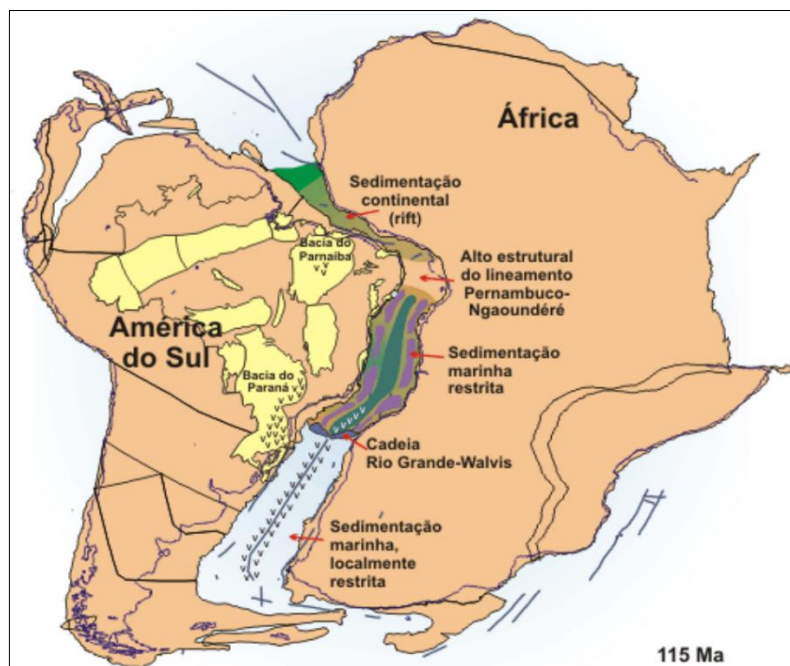
4.2 Contexto Geológico

O conhecimento geológico na PCRS é marcado por estudos predominantemente geomorfológicos e litoestratigráficos, frequentemente vinculados a prospecções petrolíferas na Bacia de Pelotas, conduzidas pela Petrobras e a partir de 1950, concentrados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), especialmente no Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (Tomazelli;

Villwock, 2000). Os pesquisadores pioneiros contribuíram significativamente para a interpretação da sua gênese e evolução geológica. Destacam-se Delaney (1962), acerca da evolução da planície costeira, assim como Tomazelli e Villwock (2000), que realizaram importantes contribuições para o entendimento dos sistemas deposicionais da PCRS. Outros pesquisadores, como Dillenburg *et al.* (2000) e Toldo Jr. *et al.* (2006) também contribuíram, com destaque para a herança geológica e dinâmica costeira, respectivamente.

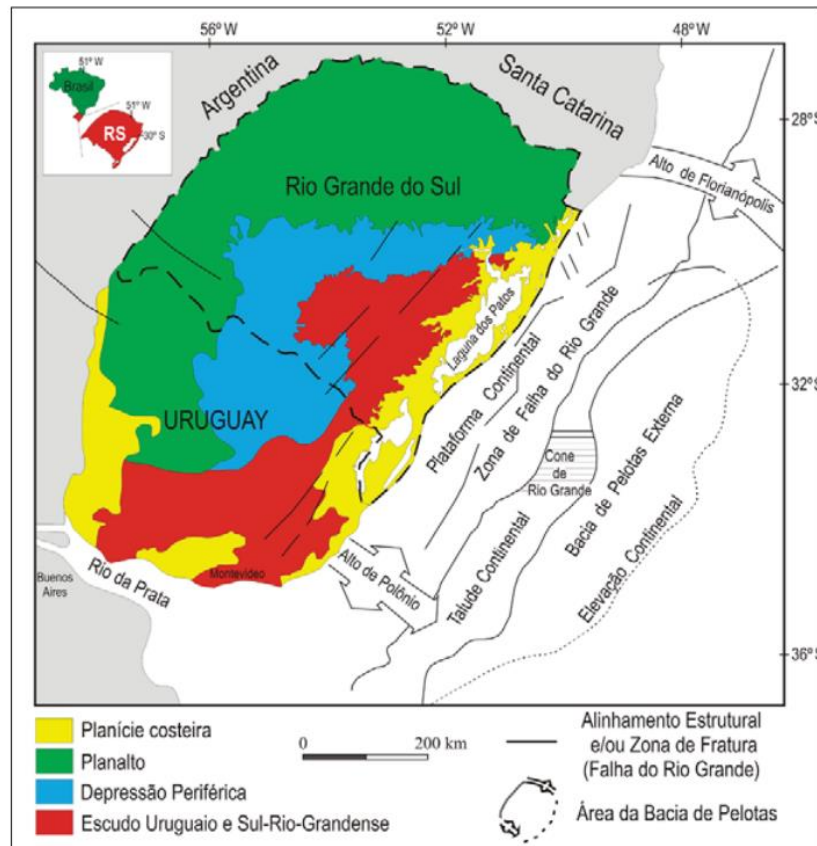
A formação da Bacia de Pelotas, iniciou-se como uma bacia de rifte intracontinental com intensa atividade tectônica que levou à deposição de sedimentos em um ambiente extensional (Figura 2 e 3), ligada aos eventos de fragmentação do supercontinente Gondwana que culminaram na ruptura da crosta continental e na abertura do oceano Atlântico Sul, durante o Cretáceo Inferior. Na medida que o oceano Atlântico Sul se abriu, do ponto de vista tectônico, a bacia evoluiu para um regime de margem continental passiva, caracterizada por sua estabilidade, sendo submetida apenas a uma lenta subsidência e a processos ativos de sedimentação influenciados pelas mudanças no nível do mar e dinâmicas de correntes costeiras. Esse evento proporcionou a deposição de grandes volumes de sedimentos provenientes de rochas do Escudo Sul-Rio-Grandense, Uruguai e sequências da Bacia do Paraná (Tomazelli; Villwock, 2000; Corrêa *et al.*, 2019).

Figura 2: Modelo tectônico do estágio da abertura do Atlântico Sul.



Fonte: Souza-Lima (2003b), apud Santos (2009).

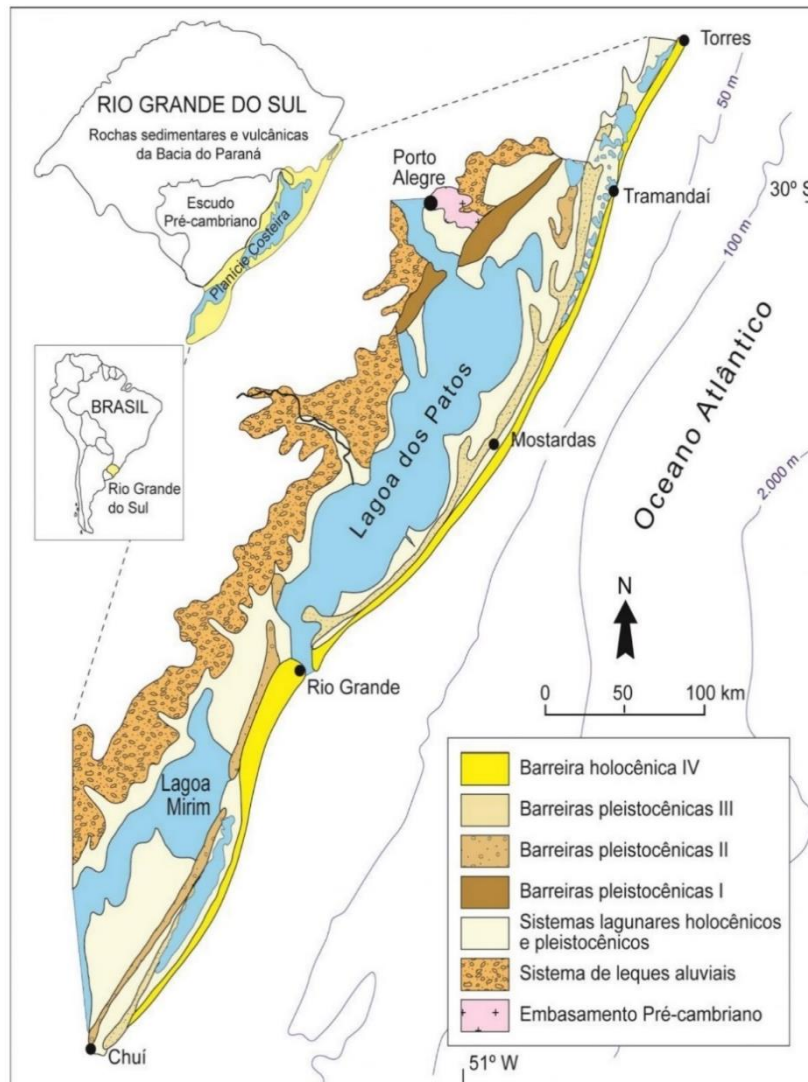
Figura 3: Principais compartimentações geológicas do RS, sendo as áreas fonte de sedimentos da Planície Costeira as rochas do Escudo Sul Rio-grandense e da Bacia do Paraná.



Fonte: Corrêa *et al.* (2019) modificado de Carraro *et al.* (1974); Corrêa (1987a).

Durante o período Quaternário uma sequência de eventos deposicionais envolvendo múltiplos ciclos de transgressões e regressões marinhas preencheram parte da Bacia de Pelotas (Barboza *et al.*, 2021). A alternância de fases transgressivas e regressivas, reflete as flutuações do nível do mar controladas por variações globais, como as glaciações e as variações na taxa de expansão dos fundos oceânicos, e por fatores tectônicos locais, como a subsidência tectônica e a sedimentação (Tomazelli, Villwock, 2000; Dillenburg *et al.*, 2005). Esses eventos levaram ao desenvolvimento de quatro sistemas do tipo laguna-barreira (Villwock *et al.*, 1984), os quais depositam-se lateralmente a um sistema de leques aluviais terciários que ocorrem próximo às áreas fontes (Figura 4), que configuram a Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

Figura 4: Mapa Geológico da PCRS.



Fonte: Extraído de Collischonn (2018).

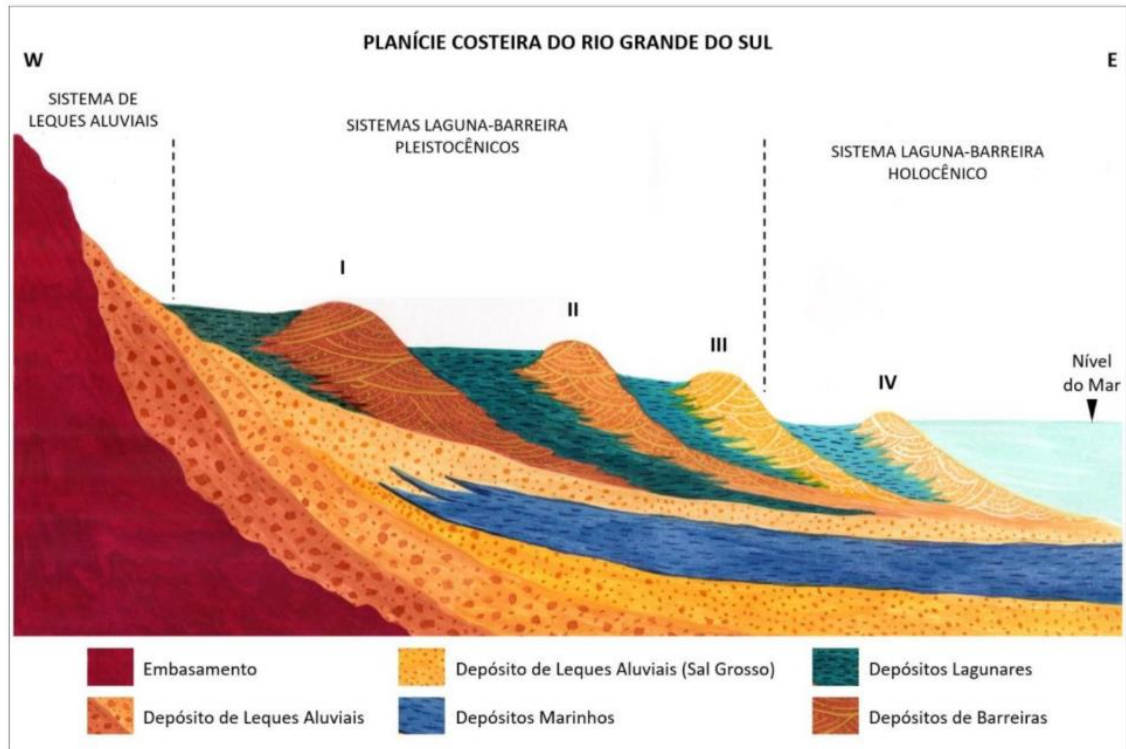
O Sistema Laguna-Barreira I foi desenvolvido durante o evento inicial de regressão-transgressão em um cenário deposicional caracterizado por depósitos aluviais e lagunares (Tomazelli, Villwock, 2000). A Barreira I é formada principalmente por processos eólicos, essa área permanece preservada no setor noroeste da PCRS, estendendo-se ao longo de uma faixa alongada com cerca de 150 km de comprimento e largura variando entre 5 e 15 km, conhecida como Coxilha das Lombas. O Sistema Laguna-Barreira II foi preservado sob um extenso corpo arenoso e um sistema de ilhas barreira que isolou a Lagoa Mirim (Troian, 2021). O Sistema Laguna-Barreira III destaca-se como o sistema pleistocênico com maior grau de preservação, que se estende quase por toda a PCRS, tornando-se fundamental para a geração do extenso Sistema Lagunar Patos-Mirim (Tomazelli; Dillenburger, 2007; Martins *et al.*, 2018;

Barboza *et al.*, 2021). Por último, o Sistema Laguna-Barreira IV, com a linha de costa atualmente ativa, formada durante o Holoceno, nos estágios finais da transgressão marinha pós-glacial, passando a ser controlada pela topografia preexistente (Dillenburg *et al.*, 2000). Este sistema compreende ambientes deposicionais eólicos, praias, e lagunares, como deltas e planícies flúvio-lagunares (Tomazelli; Villwock, 2000; Dillenburg *et al.*, 2005). O conjunto dos quatro sistemas deposicionais da PCRS é interpretado como um trato de sistemas regressivos (nível do mar em queda) da sequência superior (Rosa *et al.*, 2017; Collischonn; Rosa, 2022). Esses sistemas exibem padrões de empilhamento degradacional, com superfícies topográficas progressivamente menores em direção ao oceano, caracterizando sequências de alta frequência associadas à ciclos de regressão e progradação costeira (Rosa *et al.*, 2017).

A PCRS é, portanto, uma compartimentação geomorfológica que corresponde à porção emersa da Bacia de Pelotas, a qual abriga uma variedade de sistemas deposicionais (Figura 5), cada um com características sedimentares e paleogeográficas distintas descritas por Tomazelli e Villwock (2000) da seguinte forma:

- Sistemas de leques aluviais: Depósitos sedimentares resultantes da interação entre processos erosivos, de transporte e deposição. Caracterizados por uma geometria em forma de leque, formados pela deposição de material detrítico com granulometria controladas pela alta energia do fluxo e pela topografia, como vertentes e canais de drenagem, ou em áreas de baixa energia, como planícies aluviais.
- Sistemas lagunares: Corpos d'água restritos e rasos, com sedimentação fina e acumulação de matéria orgânica, frequentemente associados a sistemas de barreiras.
- Sistemas de barreiras: Estruturas arenosas paralelas à linha de costa, formadas pela ação das ondas e das correntes litorâneas, e que desempenham um papel fundamental nas bacias sedimentares.
- Depósitos marinhos: Sedimentos de diferentes granulometrias, originados de processos costeiros e oceânicos. Nas proximidades da costa, encontram-se areias finas a médias, geralmente associados a materiais biodetríticos como conchas de moluscos. Em águas mais profundas, os sedimentos são tipicamente constituídos por argilas e siltes que contêm matéria orgânica fina.

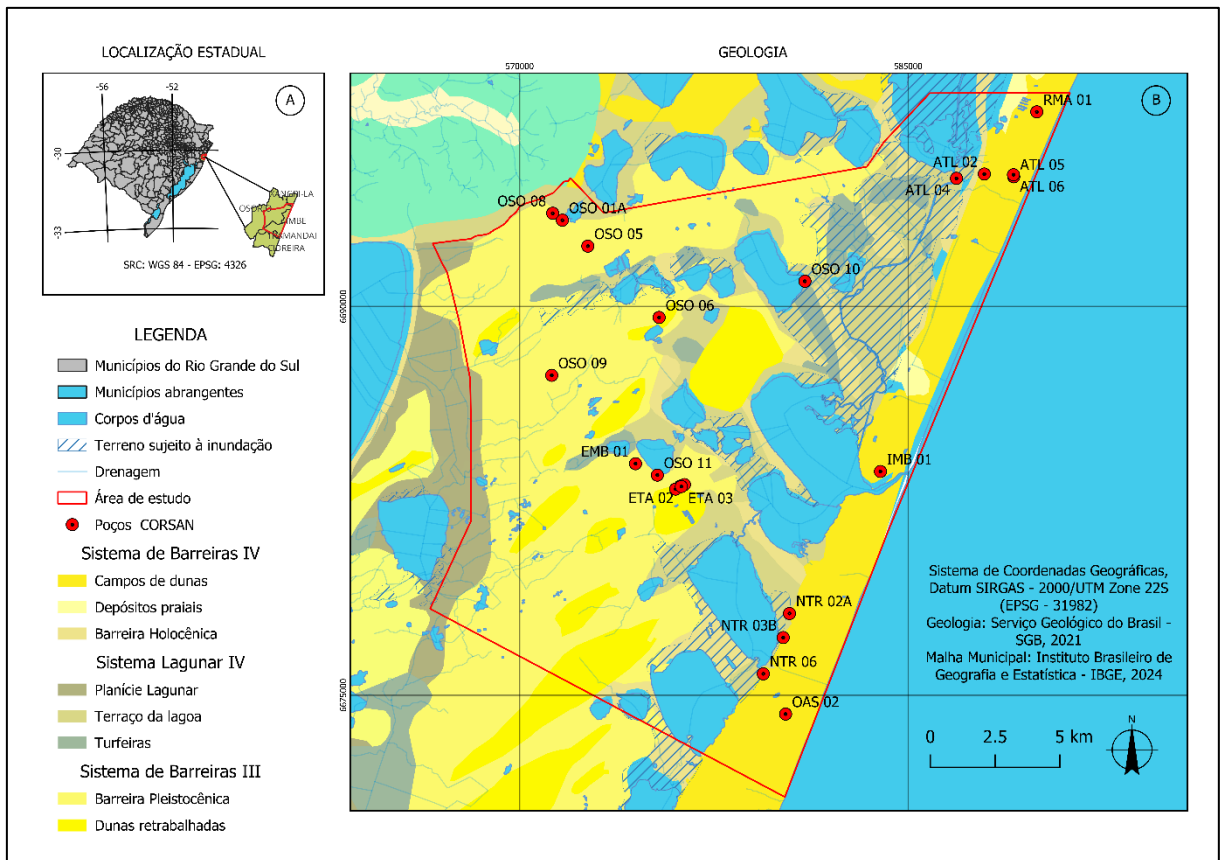
Figura 5: Perfil esquemático dos sistemas deposicionais que compõem a PCRS.



Fonte: Collischonn (2018) modificado de Tomazelli; Villwock (2000).

A área de estudo em questão compreende uma porção do Sistema Barreira III e do Sistema Laguna-Barreira IV (Figura 6), caracterizada por extensos sistemas lagunares e praias, com praias arenosas, campos de dunas, cordões praias e lagunares, lagoas segmentadas por terraços e cordões lagunares (áreas inundáveis), canais lagunares e uma laguna de conexão permanente com o oceano Atlântico, a qual corresponde ao exutório da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí.

Figura 6: Localização da área de estudo no RS (A). Mapa geológico da área de estudo (B).

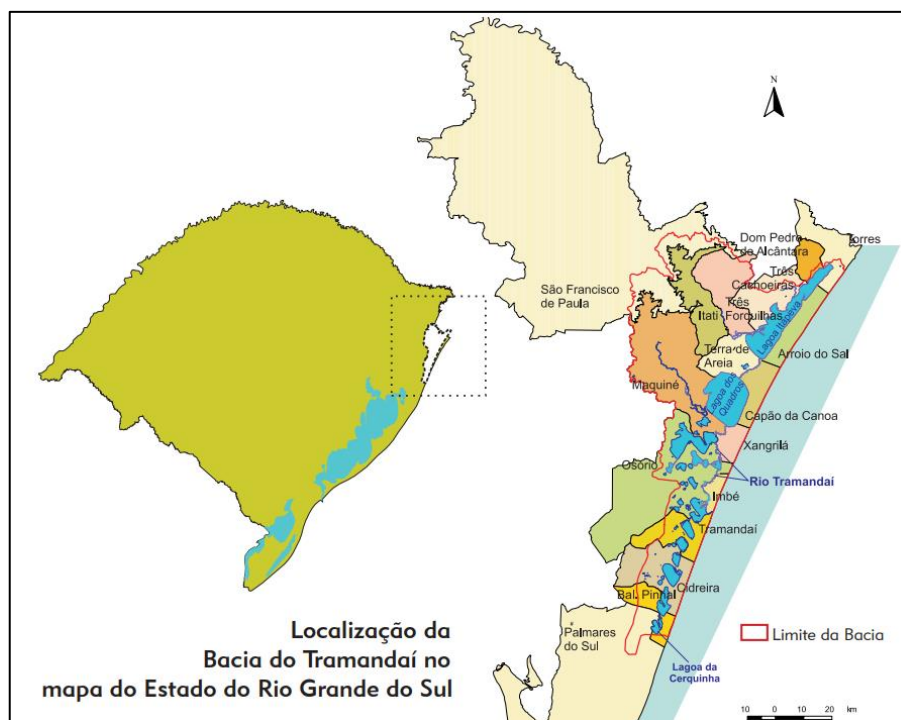


Fonte: autora.

4.3 Clima e Hidrografia

A Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí (BHRT) (Figura 7) ocupa grande parte da área de estudo e compõe a região hidrográfica do Atlântico Sul. Esta bacia corresponde ao Sistema Lagunar IV, e é limitada pelos sistemas Barreira III e IV, que funcionam como divisores de água. As águas superficiais dessa bacia têm uma contribuição diretamente relacionada às áreas de recarga do Sistema Aquífero Costeiro (SAC), especialmente das porções livres adjacentes. Na BHRT, o encontro das águas que fluem tanto de norte quanto de sul, ocorre na Laguna de Tramandaí, onde seu canal estuarino representa o exutório da bacia, onde a interferência do oceano faz com que as águas tenham salinidades variando entre 0,05 e 3% (França *et al.*, 2022). No entanto, pode haver reversões de fluxo d'água na região por influência das marés, sendo a presença de pequenos deltas formados junto aos canais lagunares indicativos desse processo (Tomazelli; Villwock, 1991).

Figura 7: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí.



Fonte: SEMA (2003).

O clima da região, segundo EMBRAPA (2012), é classificado como subtropical úmido (Cfa), baseado na classificação de Köppen-Geiger, com temperaturas elevadas durante o verão e precipitações abundantes no inverno, o que contribui para a formação de uma densa rede hidrográfica e para a ocorrência de eventos extremos com chuvas intensas e inundações. Considerando o contexto climático, a evolução do sistema de leques aluviais da PCRS foi predominantemente controlada por variações climáticas e eustáticas (Barboza et al., 2021), sendo retrabalhados durante os ciclos de clima mais úmido.

A dinâmica atmosférica da região, como aponta Santos (2019), é influenciada predominantemente por dois sistemas de alta pressão: a) anticiclone do Atlântico Sul; b) anticiclone móveis de origem polar. Durante a maior parte do ano, o primeiro sistema domina, proporcionando ventos de nordeste e condições mais secas. Já no inverno, a passagem de frentes frias estão associadas aos anticiclones polares, aumentando significativamente as precipitações, influenciando diretamente a umidade do solo e o nível dos cursos d'água.

Brack (2006) discute a vegetação e a paisagem costeira do litoral norte do RS, destacando a exuberância e a raridade das espécies presentes, além das ameaças à biodiversidade. O autor analisa a diversidade morfológica das dunas frontais e a

formação do sistema praia duna, identificando variáveis que influenciam a cobertura vegetal e a morfologia das dunas.

No contexto do litoral norte do Rio Grande do Sul, os impactos dos fenômenos são particularmente relevantes. Os desvios da precipitação pluvial, segundo estudos de Matzenauer *et al.* (2017), o El Niño leva a resultados positivos em 98% dos casos no estado, mas anomalias negativas foram registradas em Maquiné durante o outono em relação ao seu nível médio.

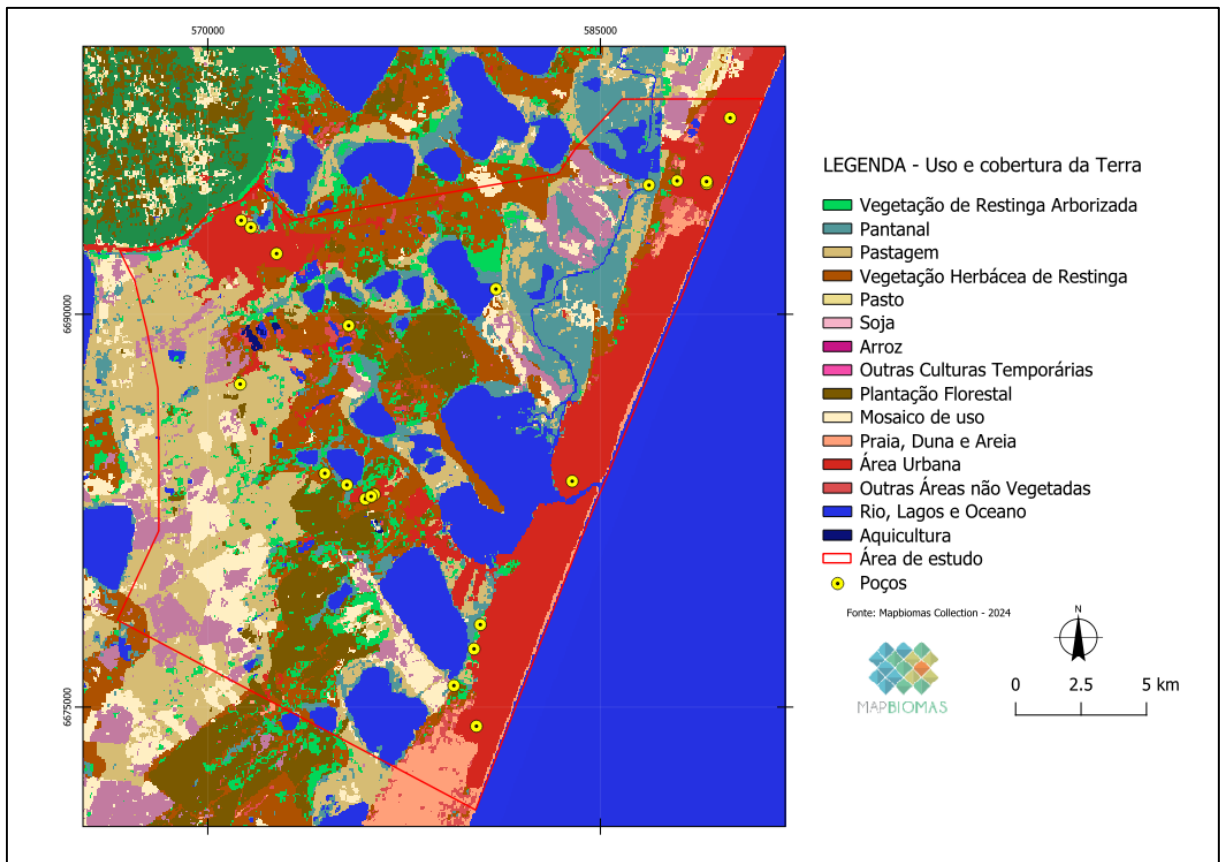
Os fatores climáticos controlam os processos costeiros que atuam na região, como ondas, marés e ventos. De acordo com Tomazelli e Villwock (2000), a costa conta com ondas de amplitudes médias de 0,5 m e um regime de micromarés, onde o transporte e a deposição de sedimentos são dominados pela ação das ondas e das correntes a elas associadas.

4.4 Uso e cobertura da Terra

O Atlas Climático da Região Sul do Brasil (EMBRAPA, 2012), afirma que a ocorrência da fauna e flora está diretamente ligada ao tipo de clima e de solo. A urbanização crescente e desordenada e as atividades agrícolas, minerárias e industriais estão entre as atividades antrópicas que contribuem para a contaminação de aquíferos costeiros por compostos orgânicos e inorgânicos.

A distribuição espacial dos mosaicos de uso e cobertura da área de estudo podem ser observadas na Figura 8. O mapa revela uma baixa predominância de cobertura vegetal, como formações florestais originais e restinga arbórea, indicando, porém, que ainda há presença de remanescentes originais. Observa-se uma ampla distribuição de áreas destinadas à agricultura e pastagens. A classe "área urbanizada" evidencia um adensamento urbano que segue em expansão, em meio de áreas naturais e agrícolas.

Figura 8: Mapa de Uso e cobertura da Terra no ano de 2024.



Fonte: Elaborado pela autora a partir da base de dados do Mapbiomas.

5 ESTADO DA ARTE

Segundo Manoel Filho (2008a) a água subterrânea compreende o volume de água que ocupa os poros e fraturas presentes nas formações geológicas subsuperficiais. Essa água pode ser encontrada tanto na zona não saturada, onde coexiste com o ar nos espaços vazios, quanto na zona saturada, completamente preenchida por água e delimitada inferiormente por uma camada impermeável. Essa água provém da infiltração favorecida por materiais porosos e permeáveis como espessas coberturas de solo, bem como pela topografia, frequência e intensidade de precipitações e presença de corpos d'água superficiais como lagos e rios. O termo aquífero refere-se a formações geológicas que têm uma capacidade significativa de armazenar e transmitir água (Fetter, 2001; Freeze; Cherry, 1979) sob certas condições físicas, tais como porosidade, permeabilidade e variações de potencial hidráulico. A porosidade é o percentual de espaço vazio em relação ao volume que permite o fluxo da água (Wicander; Monroe, 2017). Essa propriedade pode ser classificada em dois tipos: primária, instruída à presença de vazios pertencentes à matriz da rocha ou solo; e a secundária, causada por processos pós-genéticos sobre a rocha matriz, tais como a dissolução, fratura condicionada estruturalmente etc. (Pereira Cabral, 2008).

A permeabilidade refere-se à propriedade de um meio sólido permitir a passagem de água através da interconexão entre os poros (Grotzinger; Jordan, 2023), embora vise a aumentar conforme cresce a porosidade, e esteja frequentemente correlacionada à porosidade, não garante isoladamente que uma alta porosidade tenha uma alta permeabilidade.

Essas propriedades são muito significativas na avaliação da vulnerabilidade hídrica, pois está intimamente relacionado com outros dois critérios hidrogeológicos fundamentais: a capacidade de armazenamento e a transmissividade do aquífero. A condutividade hidráulica representa a facilidade com que o fluido (água) se move pelo meio (aquífero), em unidades aquíferas de elevada condutividade hidráulica, a pluma de contaminação avança acompanhando o fluxo natural das águas subterrâneas, e em cenários de baixa condutividade hidráulica é marcada pela presença de camadas argilosas, promovendo a retenção dos poluentes (Hemsi, 2024).

No contexto de ambientes de sedimentação, tais propriedades dependem do tamanho, grau de seleção e composição dos grãos. As areias são altamente porosas e permeáveis quanto mais grossas e bem selecionadas, enquanto as argilas podem

apresentar alta porosidade, porém, são altamente impermeáveis. Portanto, rochas ou sedimentos de granulometria fina são exemplos de materiais semipermeáveis ou impermeáveis que funcionam como aquíardos, ou seja, formações que apresentam menor capacidade de transmitir água, gerando um fluxo extremamente lento (Rebouças, 2008). Um aquíclode, por sua vez, é uma formação com pouca ou nenhuma capacidade de armazenamento de água (Rebouças, 1988).

Os aquíferos podem ser classificados pela pressão a que estão submetidos (Figura 9), como livres, confinados e semiconfinados (Manoel Filho, 2008b). Aquíferos livres têm uma camada superior permeável que está limitada por uma camada inferior impermeável. Geralmente encontram-se próximos à superfície, sendo mais vulneráveis à contaminação. Os aquíferos confinados e semiconfinados possuem camadas superiores e inferiores impermeáveis ou semi-impermeáveis, aumentando a carga de pressão sobre as águas subterrâneas. Devido a presença de camadas confinantes, os aquíferos confinados são menos vulneráveis à contaminação superficial, porém, mais susceptíveis à escassez hídrica decorrente da área de recarga reduzida frente a superexploração (Hirata; Fernandes, 2008).

Figura 9: Modelo hidrogeológico simplificado de um aquífero costeiro.



Fonte: Barlow (2003), apud Troian (2021).

5.1 Sistemas Aquíferos Costeiros da PCRS

Os aquíferos presentes na PCRS constituem uma importante província hidrogeológica, caracterizada pela presença de sistemas aquíferos associados a depósitos sedimentares quaternários, ou até mais antigos, conforme Troian *et al.* (2020) e Troian (2021). Os primeiros estudos sobre a hidrogeologia da PCRS

remontam às pesquisas de Hausman (1960), o primeiro pesquisador a propor uma divisão hidrogeológica do Estado, conforme o modo de ocorrência das águas subterrâneas, nos trabalhos posteriores dele, a região costeira foi classificada como Província Litorânea. Mais recentemente, Collischonn (2018) e Troian (2020) realizaram importantes contribuições para a caracterização dos sistemas aquíferos costeiros relacionados aos sistemas laguna-barreira e ao sistema de leques aluviais.

No litoral norte do estado, segundo Collischonn (2018), destaca-se um aquífero associado a um sistema aluvial, com leques aluviais nas porções mais proximais, passando distalmente para sistemas fluviais. Composto por uma camada arenosa de granulação grossa conhecida como 'Sal Grosso', este aquífero situa-se a cerca de 70 m de profundidade e apresenta alta vazão, como a registrada em Tramandaí (300 m³/h), motivo pelo qual é preferida para captação de água.

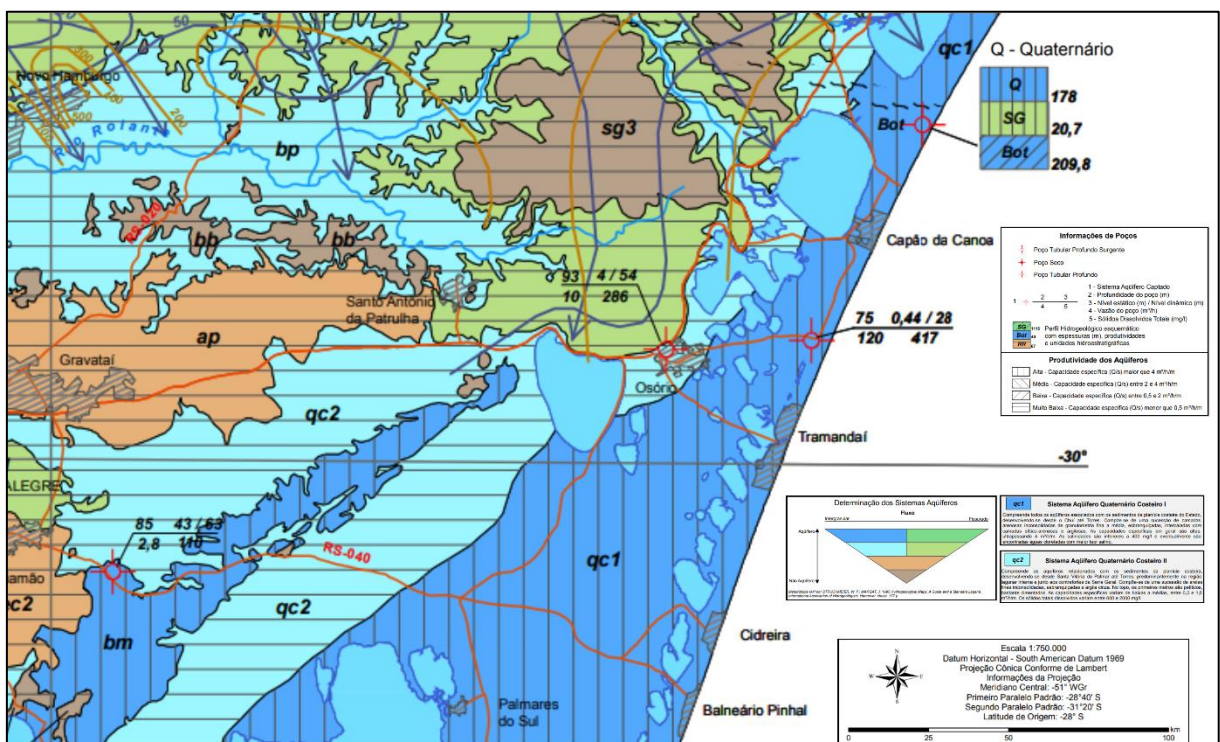
Estratigraficamente esse aquífero oferece extensão e volumes maiores, mesmo não apresentando características aquíferas em toda sua extensão devido a sua heterogeneidade relacionada aos subambientes de um sistema aluvial. Segundo Collischonn e Rosa (2022), entende-se que o canal constitui apenas um dos subambientes possíveis no complexo registro sedimentar de um sistema deposicional fluvial, sendo facilmente identificável em função da sua granulometria, a qual também se expressa na qualidade de aquífero nos municípios de Osório e Tramandaí.

Segundo o Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (Figura 10), elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), nos municípios da área de estudo destacam-se os Sistemas Aquíferos Quaternário Costeiro (SAQC) I e II:

- SAQC I, com maior extensão, estende-se de Torres até Chuí e é caracterizado por uma sucessão de fácies arenosas inconsolidadas de granulometria fina a média, intercaladas com camadas siltico-arenosas e argilosas. Apesar de ter uma alta vulnerabilidade à contaminação nas porções mais superficiais, este sistema é caracterizado por: altos valores de porosidade, permeabilidade, vazão nos poços, elevada transmissividade, capacidades específicas ultrapassando 4 m³/h/m, concentrações de sais totais inferiores a 400 mg/L, cloretadas e com maior teor salino associadas às áreas de recarga (Machado; Freitas, 2005).
- SAQC II, com menor extensão que se estende de Torres até Santa Vitória do Palmar, é composto por uma sucessão de camadas arenosas finas inconsolidadas e argilosas, onde no topo predominam camadas pelíticas

cimentadas. Esse sistema é caracterizado por: menor permeabilidade, capacidades específicas entre 0,5 e 1,5 m³/h/m, concentrações de sólidos variam entre 600 e 2.000 mg/L, bicarbonatadas, cloretadas sódicas e cálcicas (Machado; Freitas, 2005).

Figura 10: Recorte do Mapa Hidrogeológico do RS. Os números acompanhados das unidades hidroestratigráficas representam a profundidade em metros do topo do aquífero, onde Q = Quaternário; SG = Serra Geral; Bot = Formação Botucatu. A porção aproximada da área de estudo está situada sobre o qc1 (Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I) de produtividade aquífera alta e qc2 (Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II) de produtividade aquífera muito baixa.



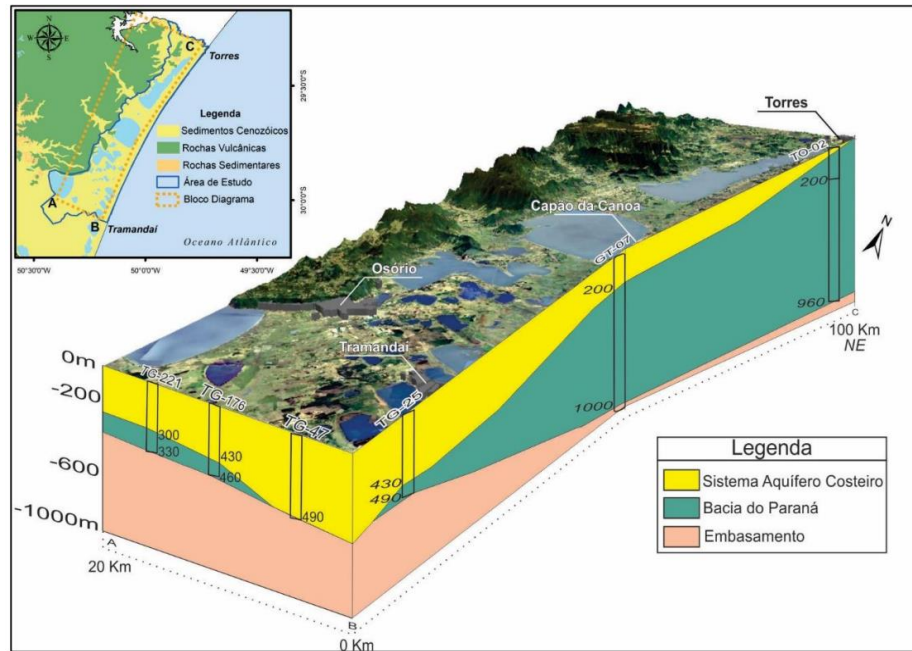
Fonte: Adaptado de Machado; Freitas (2005).

A relação entre o SAC de Troian (2020) e o SAQC do SGB/CPRM pode ser compreendida como uma relação de inclusão parcial. É provável que algumas das unidades hidroestratigráficas detalhadas e propostas por Troian estejam incluídas no SAQC do SGB/CPRM, permitindo uma melhor compreensão da heterogeneidade interna do sistema aquífero. O SGB adota uma nomenclatura mais específica, enfatizando a importância das camadas quaternárias na formação do sistema. Troian (2020), por sua vez, adota uma nomenclatura mais genérica, que inclui tanto o Quaternário quanto o Terciário. As caracterizações conforme apresentadas na Figura 11 foram realizadas a partir de dados geofísicos e hidroquímicos, de forma a

determinar os níveis de sais dissolvidos, vazão, transmissividade, porosidade total e efetiva. Estas unidades são descritas como:

- Unidade Hidroestratigráfica 1 (UH-1): corresponde a um aquífero livre, constituído por sedimentos arenosos inconsolidados relativamente homogêneos com espessuras variando de 15 a 30 m, com granulometria média a fina. Está associada aos sistemas laguna-barreira II, III e IV com concentração de sais totais dissolvidos igual a 325 ppm, porosidade total (percentual de vazios das rochas ou solo) de 39%, porosidade efetiva (percentual de vazios interconectados por onde ocorre o fluxo das águas) de 35%, com vazões médias de 16 m³/h e transmissividade de 4,5 m²/h.
- Unidade Hidroestratigráfica 2 (UH-2): é caracterizada por um pacote de sedimentos argilosos com intercalações de camadas arenosas finas a muito finas de espessuras de valores máximos de 45 m, com diminuição gradativa. Nota-se presença de fragmentos de conchas relacionados a depósitos marinhos com concentração de sais totais dissolvidos igual a 900 ppm, porosidade total de 40%, porosidade efetiva de 30%, vazões médias de 20,87 m³/h e transmissividade de 0,73 m²/h, comportando-se como uma barreira semipermeável ou aquitardo.
- Unidade Hidroestratigráfica 3 (UH-3): constitui-se por sedimentos arenosos de granulometria média a grossa, principalmente ao sul do município de Capão da Canoa com camadas de espessuras de até 30 m. Está associada a ambientes de leques aluviais com concentração de sais totais dissolvidos igual a 600 ppm, porosidade total de 40%, porosidade efetiva de 30%, vazões médias de 60,65 m³/h e transmissividade de 11 m²/h. Esta unidade corresponde a um aquífero confinado, conhecido também como 'Sal Grosso', depositado anteriormente aos sistemas laguna-barreira, cuja distribuição concentra-se especialmente nos municípios de Xangri-Lá, Tramandaí e Osório, conforme descrito por Collischonn (2021).
- Unidade Hidroestratigráfica 4 (UH-4): corresponde a um pacote de sedimentos argilosos com intercalações arenosas, localizado a uma profundidade de até 100 m. Correspondente aos depósitos marinhos mais profundos com concentração de sais totais dissolvidos igual a 2000 ppm, porosidade total de 39%, porosidade efetiva de 20% e vazões médios de 28 m³/h, comportando-se como barreiras semipermeáveis, ou aquitardo.

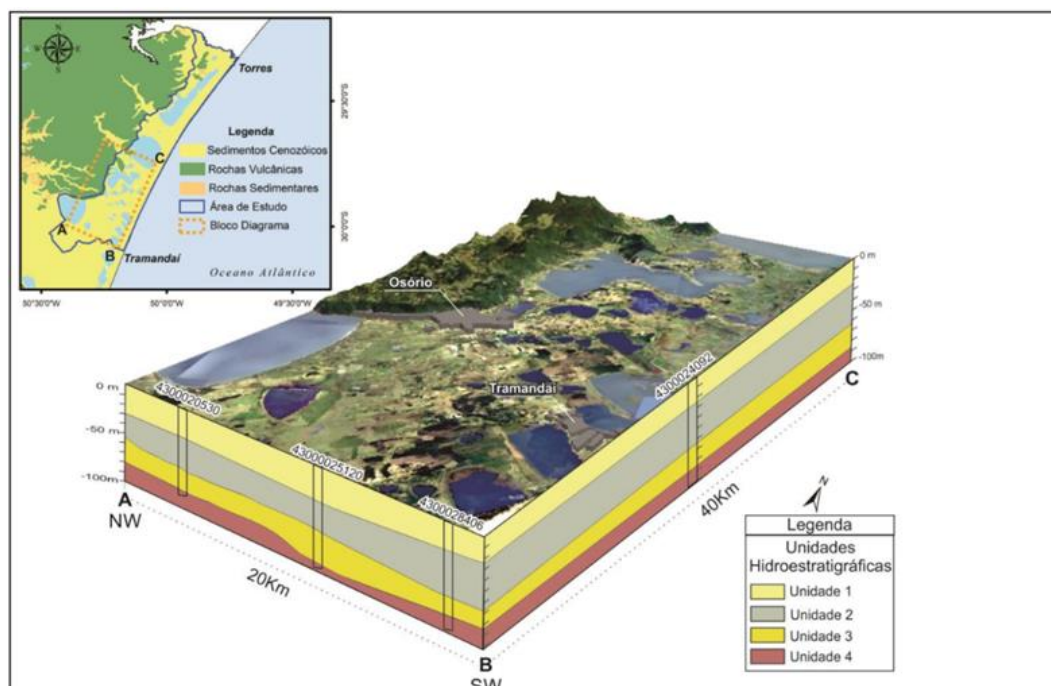
Figura 11: Representação gráfica da arquitetura geológica do pacote sedimentar do SAC.



Fonte: Troian *et al.* (2020).

Conforme Troian (2021), UH-1 e UH-3 (Figura 12) são os aquíferos com melhores características produtivas, como alta porosidade efetiva e baixa salinidade, especialmente importantes para o abastecimento local.

Figura 12: Bloco de diagrama esquemático do modelo conceitual, mostrando espessuras e distribuição das unidades hidroestratigráficas no litoral norte da PCRS, abrangendo os municípios de Tramandaí, Imbé e Osório.



Fonte: Troian (2021).

5.2 Vulnerabilidade de Aquíferos Costeiros

A vulnerabilidade de aquíferos é entendida como a suscetibilidade intrínseca do meio aquífero em ser afetado por contaminantes (Hirata, 2001). Estas características incluem a capacidade de degradação e/ou obstrução hidráulica do meio sobre os poluentes que tenham sido gerados na superfície. A vulnerabilidade natural dos aquíferos pode ser avaliada com base nas propriedades dos materiais que cobrem a zona saturada e que servem para proteger as águas subterrâneas contra uma carga contaminante (Hirata; Fernandes, 2008). No entanto, a vulnerabilidade dos aquíferos abarca também a interferência das alterações antrópicas sobre o meio, desde a superfície a partir do uso e cobertura, como em subsuperfície (Mestrinho, 2008). Portanto, representa uma problemática complexa, demandando abordagens que incluam a análise de diferentes fatores e suas interações na compreensão dos efeitos sobre as águas subterrâneas.

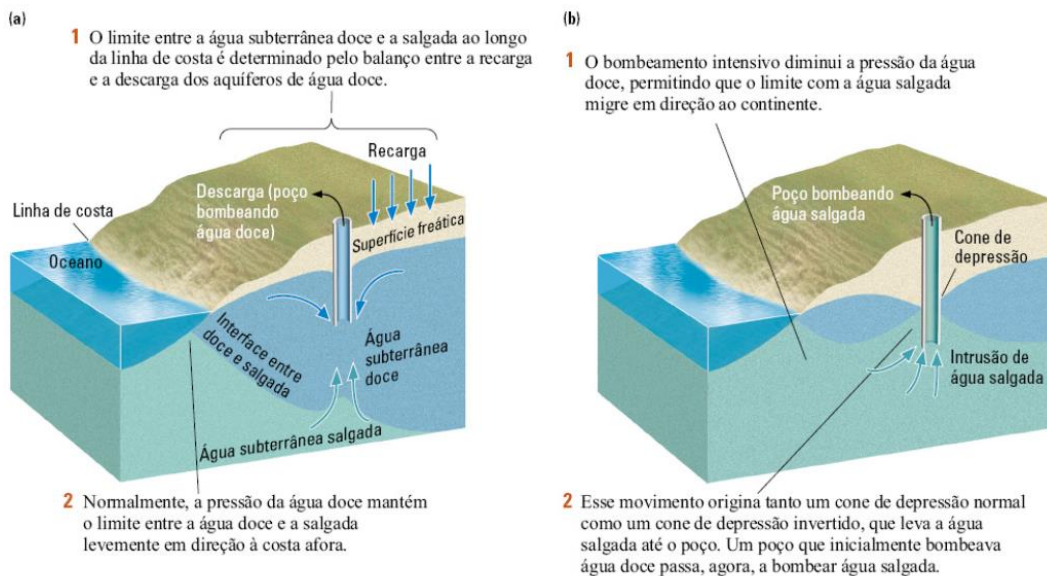
Segundo Hirata e Fernandes (2008), dois fatores podem intervir na vulnerabilidade de um aquífero: a interação entre a acessibilidade hidráulica à penetração de contaminantes e a capacidade de atenuação em reter ou reagir aos processos físico-químicos de contaminantes. Nesse sentido, a contaminação existe quando ultrapassam os limites do aquífero se este estiver localizado sob formações geológicas relativamente permeáveis em concentrações que superam a capacidade de atenuação.

O tempo de trânsito do contaminante é influenciado pela condutividade hidráulica da zona não saturada, espessura, disposição das camadas do aquífero acima, e sob condições naturais de recarga em função do clima, pois períodos mais longos favorecem a degradação de poluentes pouco persistentes, como microrganismos e compostos orgânicos degradáveis. Em climas semiáridos, a disponibilidade de água é mais relevante, enquanto, em climas úmidos, a condutividade hidráulica predomina. Nos aquíferos que possuem multicamadas, a complexa geometria pode dificultar a avaliação da vulnerabilidade, mas permite a exploração seletiva de níveis menos contaminados, dependendo da toxicidade dos compostos (Hirata; Fernandes, 2008).

Nos aquíferos litorâneos, a água subterrânea flui naturalmente em direção ao mar, local de descarga do aquífero (Iritani; Ezaki, 2012). Quando há uma superexploração dos recursos hídricos subterrâneos, levando à diminuição do nível do nível freático e à consequente migração da cunha salina em direção ao continente,

o equilíbrio é perturbado pelo bombeamento excessivo, provocando a intrusão salina. A água salgada, por ser mais densa, posiciona-se abaixo da água doce, nas camadas inferiores do aquífero, criando uma interface de equilíbrio conhecida como cunha salina. A intrusão salina (Figura 13) ocorre quando a água do mar penetra um aquífero de água doce, induzindo o avanço da cunha salina, promovendo a salinização progressiva da água doce subterrânea (Grotzinger *et al.*, 2023). Além disso, as mudanças climáticas intensificam a vulnerabilidade. Com a elevação do nível do mar, eventos extremos, a alteração dos regimes de precipitação e estiagens podem induzir processos de salinização à diminuição da disponibilidade hídrica.

Figura 13: Esquema explicativo de intrusão salina onde no primeiro quadro (A) representa uma situação em equilíbrio e no segundo quadro (B) representa a intrusão salina.



Fonte: Grotzinger *et al.* (2023).

Na área de estudo, a convergência entre o influxo marinho no canal da Laguna Tramandaí e condicionantes morfoclimáticos da região promovem acentuada variação de salinidade que se estende para as lagoas (Schwarzbold, 1982 *apud* Brack, 2006).

Portanto, os aquíferos costeiros estão expostos a diferentes modos de contaminação além da intrusão salina, como por outras atividades humanas, como a exposição de agrotóxicos usados nas atividades agrícolas, nas proximidades das áreas urbanas há exposição aos resíduos sólidos no solo e lançamento de esgoto, seja por residências, atividades industriais ou minerárias, bem como contaminação por óleo e gás de postos de gasolina ou petroleiras, o que os tornam

particularmente vulneráveis.

A caracterização da vulnerabilidade de aquíferos costeiros é fundamental para a gestão dos recursos hídricos, permitindo a identificação de áreas mais suscetíveis à contaminação. Neste contexto, o mapeamento de vulnerabilidade é um importante instrumento para a gestão dos recursos hídricos e segurança sanitária. Os métodos usados para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos seguem uma classificação por graus de suscetibilidade, considerando diversos aspectos influenciadores representados sob a forma de mapas temáticos. Dentre os métodos mais utilizados e bem estabelecidos na literatura, estão as análises baseadas em multicritérios desenvolvidas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

5.3 Análise Multicritério aplicada à Vulnerabilidade de Aquíferos

A análise multicritério é composta por várias metodologias que facilitam a comparação e avaliação. Estes critérios na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos podem incluir: características hidrogeológicas, geológicas, climáticas e antrópicas. Avaliando a importância de cada critério de forma ponderada, ou não, pode-se chegar a uma classificação hierárquica das alternativas a serem utilizadas e mais adequadas para as características específicas da área de estudo e da disponibilidade de dados. Entre os métodos paramétricos amplamente utilizados encontra-se o DRASTIC descrito por Aller *et al.* (1987) com pesos diferentes para cada critério e hierarquizados. Por outro lado, o GOD descrito pela dupla Foster e Hirata (1988), onde cada critério tem mesmo peso e grau de importância, tem sido uma alternativa viável na falta de dados preliminares, pois simplifica os critérios envolvidos no DRASTIC. É importante ter cautela ao comparar diferentes métodos de avaliação de vulnerabilidade, devido ao contexto de cada análise, as quais incluem níveis substanciais ou variados de incerteza. A eficácia da análise está ligada à qualidade dos dados necessários para aquisição dos critérios envolvidos.

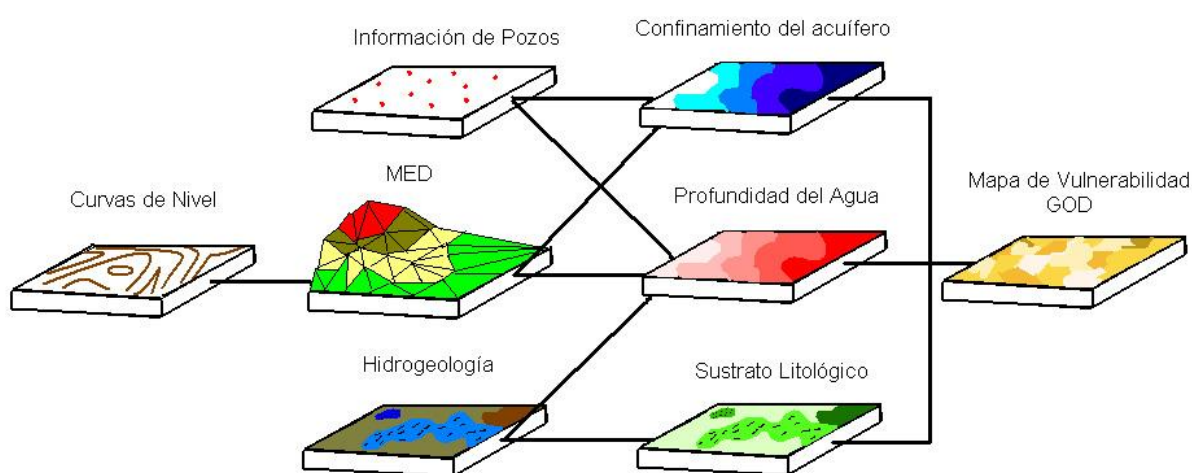
5.3.1 Método GOD

O acrônimo GOD (*Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater*) é uma metodologia para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação, através dos critérios hidrogeológicos (Foster; Hirata, 1988). O método serve como uma alternativa simplificada para avaliação da vulnerabilidade quando há poucos dados. Os critérios incluem: (G) grau de

confinamento do aquífero, (O) ocorrência dos estratos de cobertura e (D) profundidade até o topo do aquífero.

A Figura 14 ilustra de forma esquemática os principais dados de entrada utilizados no método GOD, os quais são integrados para gerar um mapa de vulnerabilidade. Os dados de poços fornecem informações sobre a profundidade do nível d'água e o tipo de aquífero (confinado ou livre). Os mapas de hidrogeologia fornecem informações sobre as unidades litológicas e dos diferentes tipos de rochas e sedimentos.

Figura 14: Esquema simplificado do método GOD.



Fonte: Agüero e Pujol (2002).

O grau de confinamento do aquífero (*Groundwater hydraulic confinement*) está associado ao tipo de restrição ao fluxo de água subterrânea, determinado pela presença ou ausência de camadas impermeáveis acima e abaixo do aquífero. Esse índice é usado pois considera a presença e a espessura das camadas onde um contaminante pode alcançar ou se dispersar no aquífero. Um aquífero confinado, por exemplo, é menos vulnerável à contaminação em comparação a um aquífero não confinado (livre), que está em contato direto com a superfície freática. A atribuição de valores numéricos para este critério varia entre 0 (ausência de confinamento) e 1 (aquífero livre), sendo que valores intermediários representam graus intermediários de confinamento.

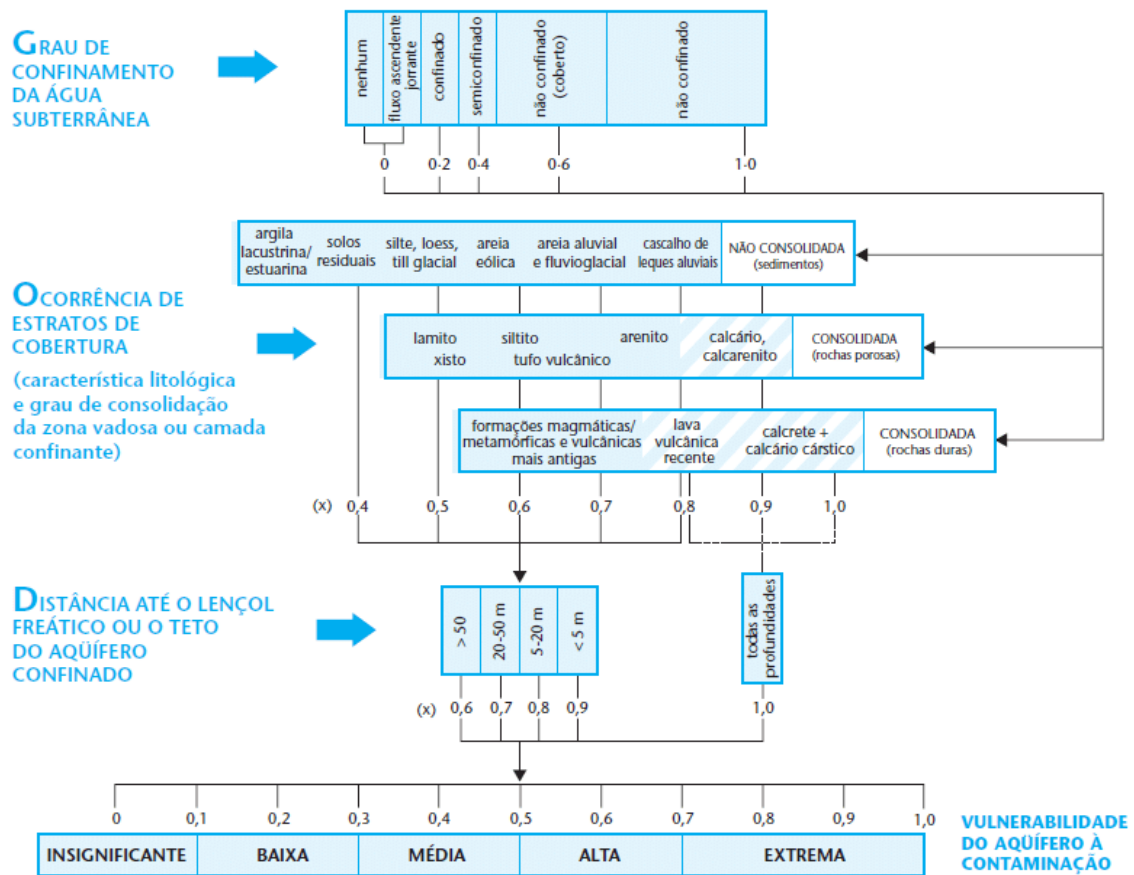
A ocorrência dos estratos de cobertura (*Overlying strata*) avalia a característica dos materiais que recobrem as camadas do aquífero, como argilas, siltes, areias e rochas. Esse índice é usado pois alguns materiais possuem maior capacidade de reter

os contaminantes, essa propriedade é conhecida como adsorção. As argilas, por exemplo, possuem baixa permeabilidade, atuando como barreiras, impedindo a infiltração. Enquanto materiais permeáveis, como arenitos e rochas fraturadas, facilitam a infiltração de contaminantes. A atribuição de valores numéricos para este critério considera a permeabilidade e a espessura dos materiais de cobertura, variando entre 0,3 (baixa permeabilidade) e 1,0 (alta permeabilidade).

A profundidade até o topo do aquífero (*Depth to groundwater table*) é a distância da água subterrânea até a superfície. Serve como indicador da espessura da zona não saturada de atenuação natural, onde os contaminantes podem ser retidos ou degradados. Quanto maior a profundidade, maior a proteção do aquífero e o tempo que um contaminante leva para alcançar o aquífero, aumentando a chance de processos de atenuação natural. A atribuição de valores numéricos para este critério varia entre 0,4 (grande profundidade) e 1,0 (pequena profundidade).

Os valores atribuídos aos critérios do método GOD (Figura 15) devem ser inseridos em uma planilha e multiplicados conforme a equação $GOD = G \times O \times D$. O resultado do cálculo é um valor numérico entre 0 e 1 classificado em classes de vulnerabilidade subdivididas em extrema, alta, média, baixa ou insignificante, conforme proposto por Foster e Hirata (1988). A combinação desses critérios permite gerar um mapa de vulnerabilidade que classifica a área de estudo em classes de vulnerabilidade, auxiliando na identificação das áreas mais suscetíveis à contaminação.

Figura 15: Critérios e índices do método GOD com os valores atribuídos para a classificação da vulnerabilidade.

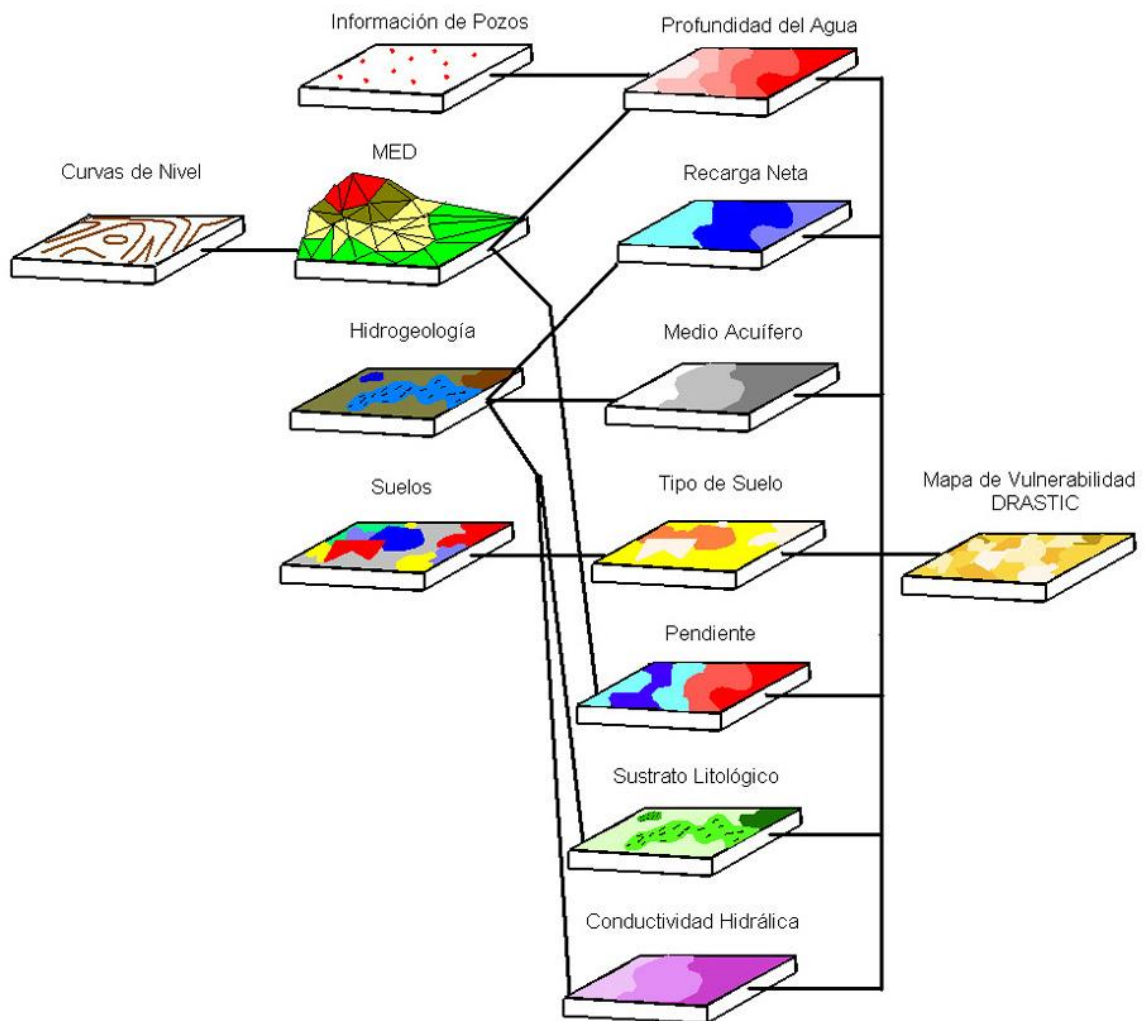


Fonte: Foster *et al.* (2006).

5.3.2 Método DRASTIC

O método DRASTIC costuma ser útil e mais complexo considerando dados de recarga, tipo de solo, topografia, e condutividade hidráulica, ausentes no método anterior. Essa metodologia envolve a combinação de sete critérios a fim de caracterizar a suscetibilidade de um aquífero. Para cada critério é atribuído um peso, e com a integração dos sete critérios no ambiente SIG, é produzido o mapa de vulnerabilidade, conforme proposto originalmente por Aller *et al.* (1987). A Figura 16 apresenta de forma esquemática os principais dados de entrada utilizados no método DRASTIC.

Figura 16: Esquema simplificado do método DRASTIC.



Fonte: Agüero e Pujol (2002).

A profundidade do nível de água (*Depth to Water Table*) representa a distância vertical entre a superfície do terreno e o topo do aquífero, ou seja, o nível freático. Essa profundidade corresponde à espessura de material inconsolidado, solo e zona não saturados, que um eventual contaminante precisa atravessar antes de atingir a zona saturada. Valores maiores indicam maior espessura de sedimentos atuando como barreira natural, favorecendo processos de atenuação e resultando em menor vulnerabilidade. Por outro lado, profundidades menores implicam curto tempo de trânsito e maior suscetibilidade do aquífero à contaminação, uma vez que o contaminante pode alcançar o nível freático mais rapidamente.

A recarga (*Recharge*) é a quantidade de água que infiltra no aquífero. As áreas com alta recarga são mais vulneráveis, pois a água que infiltra pode transportar contaminantes. A recarga é influenciada por fatores como precipitação,

evapotranspiração e características do solo. Este critério é importante pois, em áreas com alta recarga, a maior infiltração de água pode facilitar o transporte de contaminantes até o aquífero, aumentando sua vulnerabilidade.

O meio aquífero (*Aquifer Media*) trata-se da influência das propriedades intrínsecas na capacidade de um contaminante se mover através do material presente no meio. A composição mineralógica, granulometria e a textura do material que determinam a permeabilidade do meio, são observadas em mapas geológicos referentes à descrição litológica das áreas de captação. Materiais porosos e fraturados, como arenitos e calcários, possuem maior mobilidade de água e de contaminantes.

O tipo do solo (*Soil Media*) considera a textura, estrutura e permeabilidade que influenciam significativamente a infiltração e o transporte de contaminantes no solo. Os solos arenosos, por exemplo, são mais permeáveis que solos argilosos, facilitando a percolação de contaminantes.

A topografia (*Topography*) considera a influência do relevo na direção e velocidade do fluxo de água, com base em um mapa de declividade obtido a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT). Esse critério está relacionado à capacidade de infiltração da água no solo: áreas com menor declividade favorecem a infiltração, o que pode facilitar o transporte de contaminantes até o aquífero, aumentando sua vulnerabilidade. Já áreas com maior declividade tendem a apresentar maior escoamento superficial, o que reduz a infiltração e, conseqüentemente, a vulnerabilidade à contaminação. Por isso, no método DRASTIC, menores declividades recebem pontuações mais altas, indicando maior risco.

A influência da zona não saturada (*Impact to vadose zone*) é a área não saturada acima da zona saturada de um aquífero que se estende até o nível freático, sob as características hidrogeológicas. Serve para determinar quanto tempo um contaminante leva para atravessar na zona não saturada antes de atingir o aquífero, após ser introduzido na superfície terrestre e infiltrado no solo. Esse critério é extraído através da interpretação dos mapas geológicos e pedológicos locais.

A condutividade hidráulica (*Hydraulic Conductivity*) serve para avaliar a velocidade de transporte de potenciais contaminantes no aquífero, pois considera a capacidade do material do aquífero em movimentar a água e, conseqüentemente, os contaminantes. É avaliada considerando os relatórios de testes de bombeamento.

Um exemplo de aplicação do DRASTIC, foi realizado pela CPRM ao Sistema

Aquífero Guarani, onde os índices e pesos relativos a cada um dos critérios (Figura 17) receberam uma classificação numérica de 1 a 10 e multiplicados por um fator de ponderação variando de 1 a 5, como indicado na expressão abaixo, onde (r) indica classificação ou fator de classificação e (w) indica fator de ponderação:

$$DRASTIC = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw)$$

Figura 17: Critérios e índices do método DRASTIC com os valores atribuídos, exemplo de aplicação ao Sistema Aquífero Guarani realizado pela CPRM.

D - Profundidade do NA		R - Recarga (cm)		A - Meio aquífero			
Intervalo	Grau	Intervalo	Grau	Tipo	Grau		
0-2	10	0-3	1		Intervalo	Típico	Real
2-5	9	3-10	3	Argilito maciça	1-3	2	—
5-10	7	10-18	6	Metamórfica/Ígnea	2-5	3	—
10-17	5	18-25	8	M/I intemperizada	3-5	4	—
17-26	3	>25	9	Till glacial	4-6	5	—
26-34	2			Argilito/siltito laminada(o)	5-9	6	—
>34	1			Arenito maciço	4-9	6	6
				Calcário maciço	4-9	6	—
				Areia ou cascalho	4-9	8	—
				Basalto	2-10	9	—
				Calcário cárstico	9-10	10	—

S - Solo		T - Declividade (%)		I - Material da zona vadosa			
Tipo	Grau	Intervalo	Grau	Tipo	Grau		
Fino/ausente	10	0-2	10		Intervalo	Típico	Real
Cascalho	10	2-6	9	Camada confinante	1	1	—
Areia	9	6-12	5	Silte/argila	2-6	3	—
Turfa	8	12-18	3	Argilito	2-5	3	—
Argila estruturada	7	>18	1	Calcário	2-7	6	—
* Loam	5			Arenito	4-8	6	—
Loam siltoso	4			Argilito/siltito laminado	4-8	6	—
Loam argiloso	3			Areia e cascalho com silte e argila	4-8	6	—
** Muck	2			Metamórfica/Ígnea	2-8	4	—
Argila maciça	1			Areia e cascalho	6-9	8	8
				Basalto	2-10	9	—
				Calcário cárstico	8-10	10	—

C - Condutividade hidráulica (m/s)	
Intervalo	Grau
5.10^{-7} - 5.10^{-5}	1
5.10^{-5} - 1.10^{-4}	2
1.10^{-4} - 3.10^{-4}	4
3.10^{-4} - 5.10^{-4}	6
5.10^{-4} - 10.10^{-4}	8
$> 10.10^{-4}$	10

Fatores de ponderação e índice DRASTIC final	
D	7.5 = 35
R	8.4 = 32
A	6.3 = 18
S	9.2 = 18
T	5.1 = 5
I	8.5 = 40
C	2.3 = 6
Total	= 154

(*) Loam = solo rico e permeável composto por mistura firável de proporções relativamente iguais de argila, silte e areia, geralmente contendo matéria orgânica (humus) em quantidade variável.

(**) Muck = matéria orgânica bem decomposta, escura e finamente dividida, misturada com porcentagem elevada de matéria mineral, geralmente silte; usa-se o termo *muck soil* para um solo que contém pelo menos 50% de matéria orgânica bem decomposta.

Fonte: Hirata e Fernandes (2008).

O valor final do índice DRASTIC indica o grau de vulnerabilidade do aquífero à contaminação: quanto maior o número, maior o risco. Os resultados são divididos em faixas, que indicam se a vulnerabilidade é insignificante, moderada, alta ou extrema (Aller *et al.*, 1987). Na aplicação ao Sistema Aquífero Guarani realizado pela CPRM, o valor final foi de 154, e de acordo com a Figura 18, esse valor estaria no intervalo de 140 a 159, sendo classificado como moderada vulnerabilidade.

Figura 18: Intervalos de valores e classificação correspondente.

Intervalo de Valores	Classificação da Vulnerabilidade
< 100	Insignificante
101 a 119	Muito Baixa
120 a 139	Baixa
140 a 159	Moderada
160 a 179	Alta
180 a 199	Muito Alta
> 200	Extrema

Fonte: Aller *et al.* (1987).

5.3.3 Análise de Vulnerabilidade do SAC no Litoral Norte da PCRS

Existem alguns estudos de vulnerabilidade realizados no litoral do RS, dentre eles, Trindade (2022), que analisou a vulnerabilidade e o risco de contaminação do aquífero costeiro na região de Cidreira e Balneário Pinhal, a sul da área de estudo deste trabalho, pelos métodos GOD e POSH (*Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*), utilizados para avaliar o risco de contaminação do solo de fontes pontuais e difusas de contaminação, considerando duas variáveis: a origem do contaminante e a sobrecarga hidráulica.

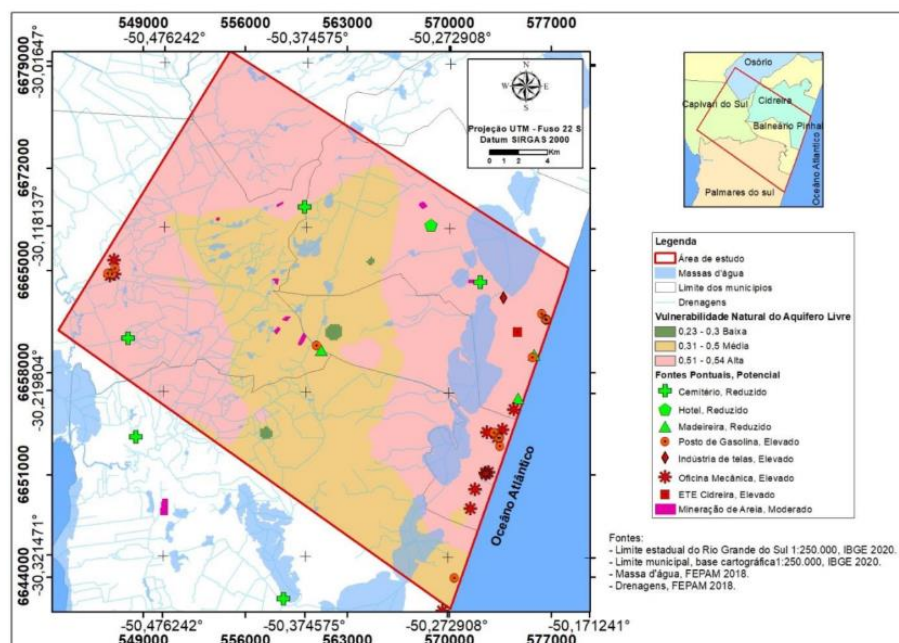
Trindade (2022) descreveu dois tipos de aquíferos: um livre, composto essencialmente por sedimentos arenosos e localizado acima de 30 metros onde se verifica uma elevada suscetibilidade à contaminação; e um aquífero semiconfinado/confinado, composto por camadas arenosas abaixo de 30 metros, alternando entre condições de confinamento conforme a presença de camadas argilosas. De acordo com a autora existem diferenças significativas na vulnerabilidade dos dois aquíferos costeiros de Cidreira e Balneário Pinhal, na medida em que o primeiro (livre) é mais propenso à contaminação devido a depósitos eólicos associados aos depósitos dos Sistema Laguna-barreira II, III e IV. Por outro lado, o

aquífero confinado e semiconfinado, que contém camadas impermeáveis de argila, é menos vulnerável devido a esta característica.

Na análise de Trindade (2022), o aquífero livre revelou que 61% de sua área possui alta vulnerabilidade, relacionada a sedimentos arenosos, enquanto 38% da área apresentava média vulnerabilidade vinculada a sedimentos lagunares. O aquífero semiconfinado/confinado, por sua vez, mostrou 73% de sua área com vulnerabilidade média em zonas não confinantes, onde os estratos arenosos tinham profundidade do nível freático que variava entre 5 e 20 metros. No entanto, 24% da sua área exibia vulnerabilidade baixa associada a áreas confinadas por camadas argilosas (Trindade, 2022).

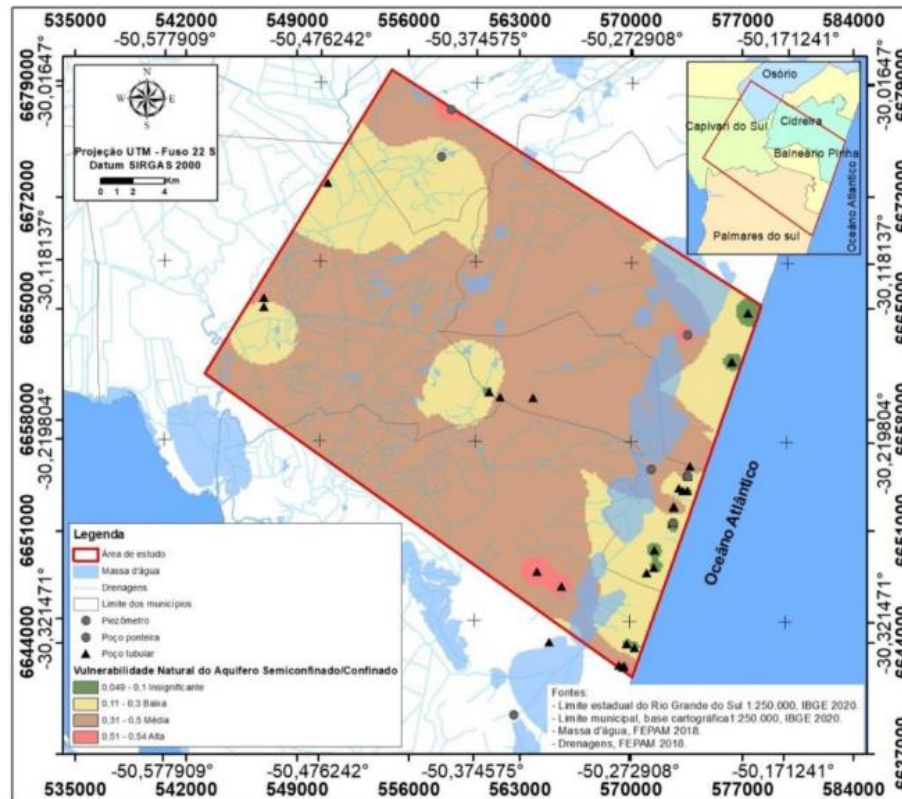
Os resultados de Trindade (2022), indicaram uma vulnerabilidade heterogênea (Figuras 19 e 20) e riscos de contaminação ao aquífero livre entre moderado a alto, uma vez que existem fontes de contaminação de origem urbana e rural, como resíduos e práticas agrícolas. No aquífero semiconfinado/confinado, o risco é maioritariamente baixo a moderado. Assim, 61% da área do aquífero livre, podendo ser correlacionado à UH-1, demonstra vulnerabilidade alto a moderado e um risco de contaminação considerável em seu conteúdo, enquanto apenas 7% apresentam a mesma vulnerabilidade em um aquífero semiconfinado/confinado, podendo ser correlacionado à UH-2.

Figura 19: Mapa da vulnerabilidade do aquífero livre obtido da região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS.



Fonte: Trindade (2022).

Figura 20: Mapa da vulnerabilidade do aquífero semiconfinado/confinado obtido da região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS.



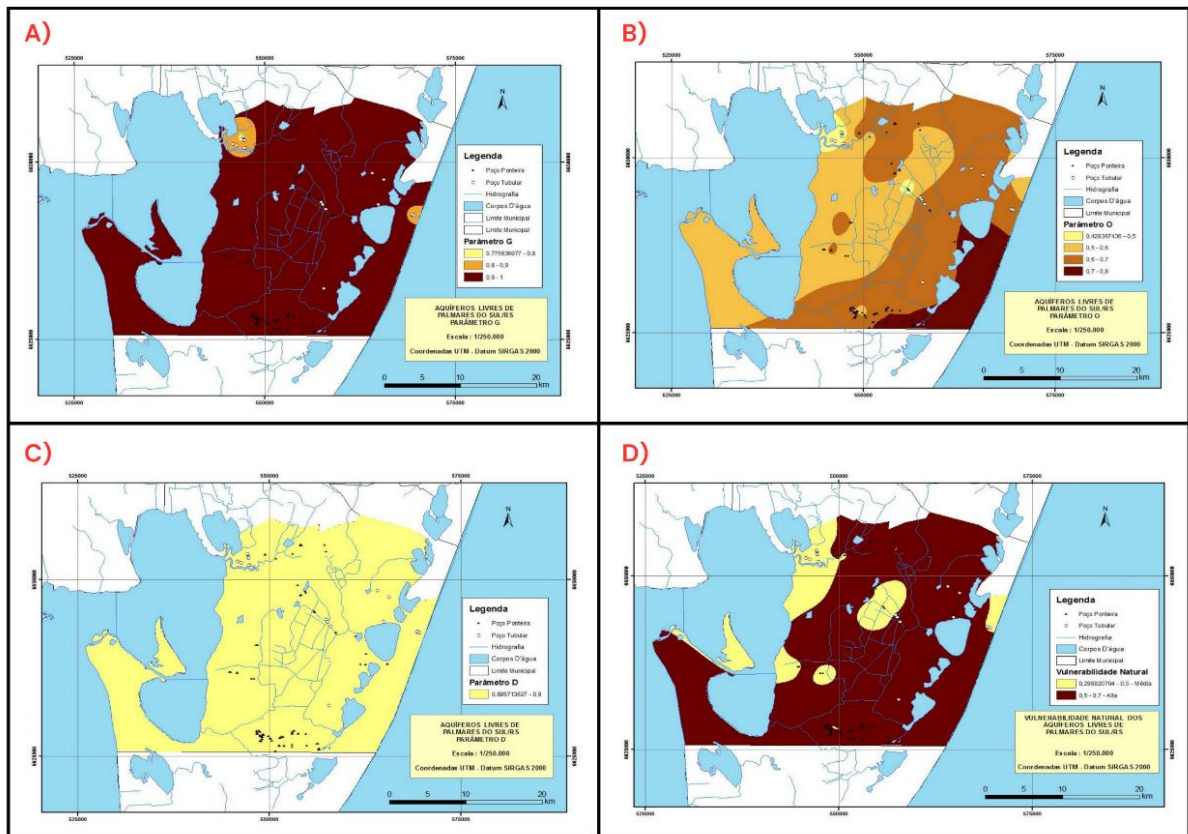
Fonte: Trindade (2022).

Outro trabalho relevante de vulnerabilidade na PCRS é o estudo conduzido em Palmares do Sul por Camargo (2016), no qual a vulnerabilidade natural dos aquíferos foi avaliada por meio da aplicação sistemática do método GOD. A autora testou diversos interpoladores para a geração dos modelos espaciais dos critérios e da vulnerabilidade, concluindo que o método *Topo to Raster* apresentou o comportamento mais adequado e razoável para a quantidade de pontos disponíveis e sua distribuição geométrica, garantindo continuidade espacial e evitando a formação de "artefatos" (erros comuns que ocorrem em mapas gerados por métodos de interpolação de dados espaciais). A autora ressalta que a interpolação na porção sul da área foi prejudicada pela escassez de pontos (poços), o que pode ter resultado em limites espaciais menos representativos.

A análise de Camargo (2016) considerou separadamente os aquíferos livres e confinados. Os resultados demonstraram que os aquíferos livres (Figura 21) de Palmares do Sul apresentam majoritariamente vulnerabilidade alta, representando 85% da área avaliada, enquanto 15% situam-se na classe de vulnerabilidade média.

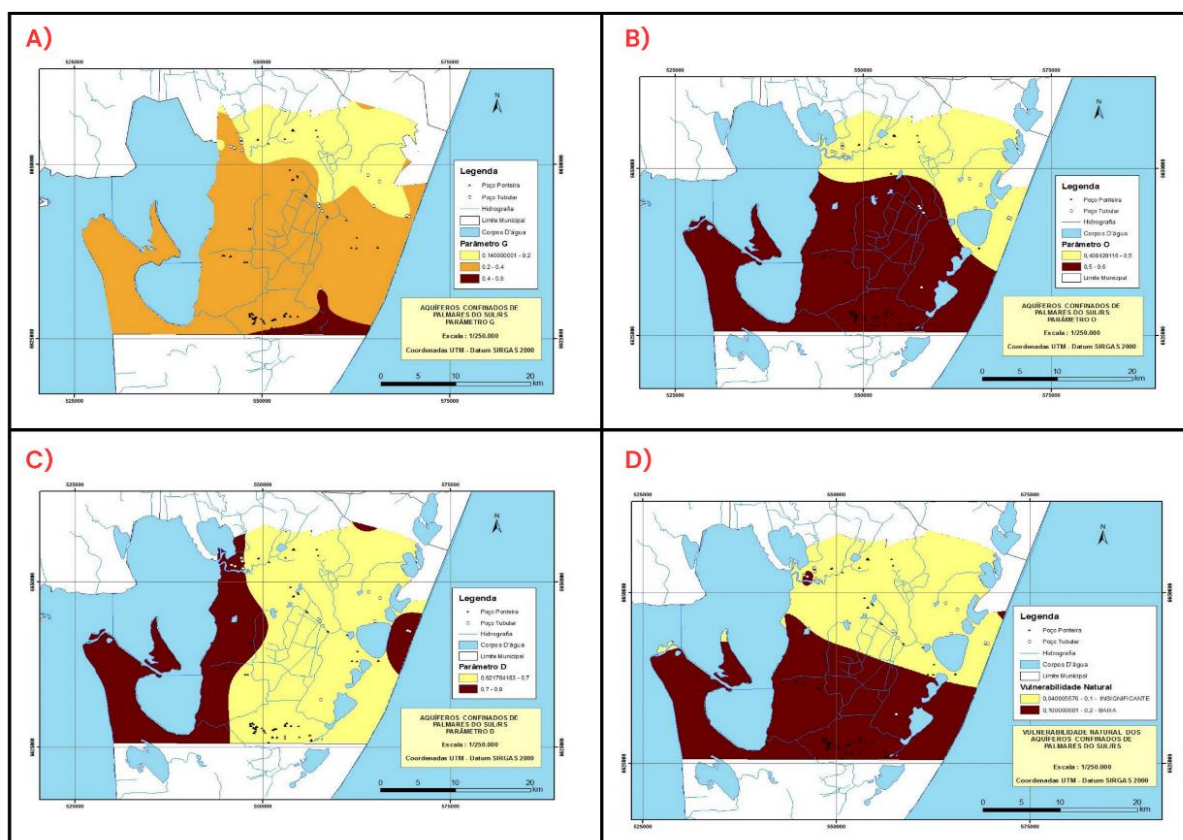
Esse padrão reflete tanto a baixa profundidade do nível freático quanto a predominância de depósitos arenosos de alta permeabilidade que constituem os estratos de cobertura. Por outro lado, os aquíferos confinados (Figura 22) exibiram vulnerabilidade baixa (52%) e insignificante (48%), indicando elevada capacidade natural de proteção conferida pelas camadas argilosas regionais.

Figura 21: Mapas dos critérios do método GOD no município de Palmares do Sul/RS.
(A) Critério G; (B) Critério O; (C) Critério D; (D) Vulnerabilidade natural resultante para o aquífero livre.



Fonte: Camargo (2016).

Figura 22: Mapas dos critérios do método GOD no município de Palmares do Sul/RS.
 (A) Critério G; (B) Critério O; (C) Critério D; (D) Vulnerabilidade natural resultante para o aquífero confinado.



Fonte: Camargo (2016).

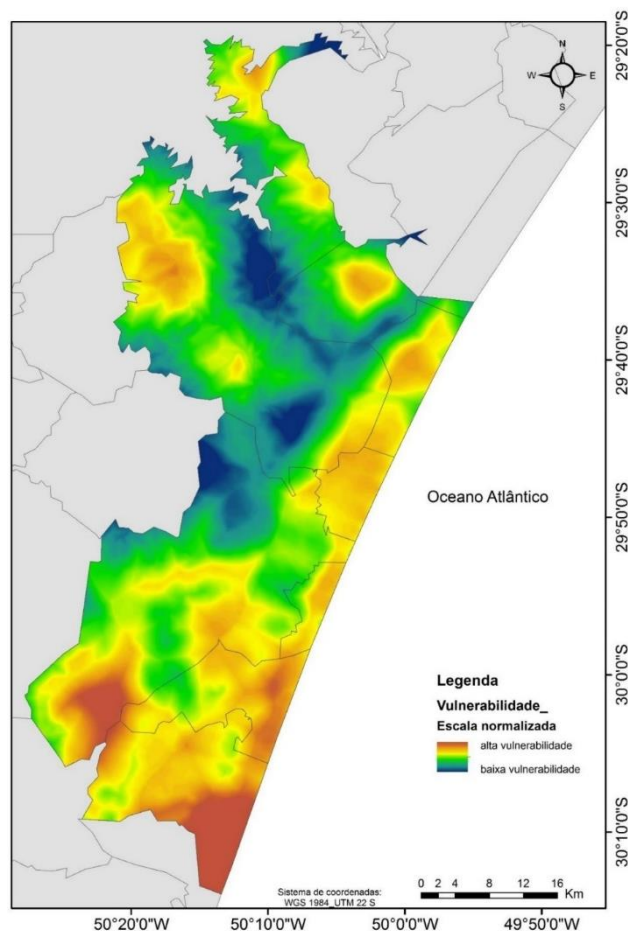
Do ponto de vista hidrogeológico e de gestão, o estudo de Camargo (2016) concluiu que os poços de ponteira, que captam exclusivamente aquíferos livres, encontram-se quase integralmente em zonas de vulnerabilidade alta, tornando sua água subterrânea mais suscetível à contaminação por intervenções antrópicas. Em contraste, os poços tubulares profundos, predominantemente instalados em aquíferos confinados, localizam-se em áreas classificadas como de vulnerabilidade insignificante, evidenciando condições naturais mais favoráveis à proteção da qualidade da água explotada.

Além disso, Gauer (2015) elaborou um estudo de vulnerabilidade ambiental com intuito de avaliar as fragilidades dos sistemas ambientais frente a diferentes pressões antrópicas abrangendo os nove municípios do litoral norte do RS. O estudo não trata diretamente da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos, porém seus resultados são relevantes para contextualizar o uso e a ocupação da área de

estudo, indicando regiões de maior pressão antrópica sobre o sistema aquífero da região e, portanto, potencialmente mais suscetíveis a impactos ambientais diversos.

A análise de Gauer (2015) foi baseada na abordagem multicritério pelo método Delphi e AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para integrar variáveis de pressão antrópica e características ambientais, onde os pesos para aplicação no AHP foi baseada no Delphi. O mapa de análise da pressão ambiental (Figura 23) mostraram que nos municípios estritamente litorâneos, a vulnerabilidade foi elevada em quase toda a extensão territorial, sem ocorrência significativa de zonas de baixa vulnerabilidade. Osório e Cidreira apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade ambiental, devido à presença de estradas, parques eólicos, silvicultura, atividades mineradoras, agropecuária e urbanização contínua, concluindo que a pressão antrópica predomina em todos os municípios, especialmente na faixa costeira, onde coexistem urbanização, agropecuária e elementos naturais sensíveis, como dunas, lagoas e áreas úmidas.

Figura 23: Mapa de análise normalizada da vulnerabilidade ambiental do litoral norte do RS.



Fonte: Gauer, 2015.

6 METODOLOGIA GODASI

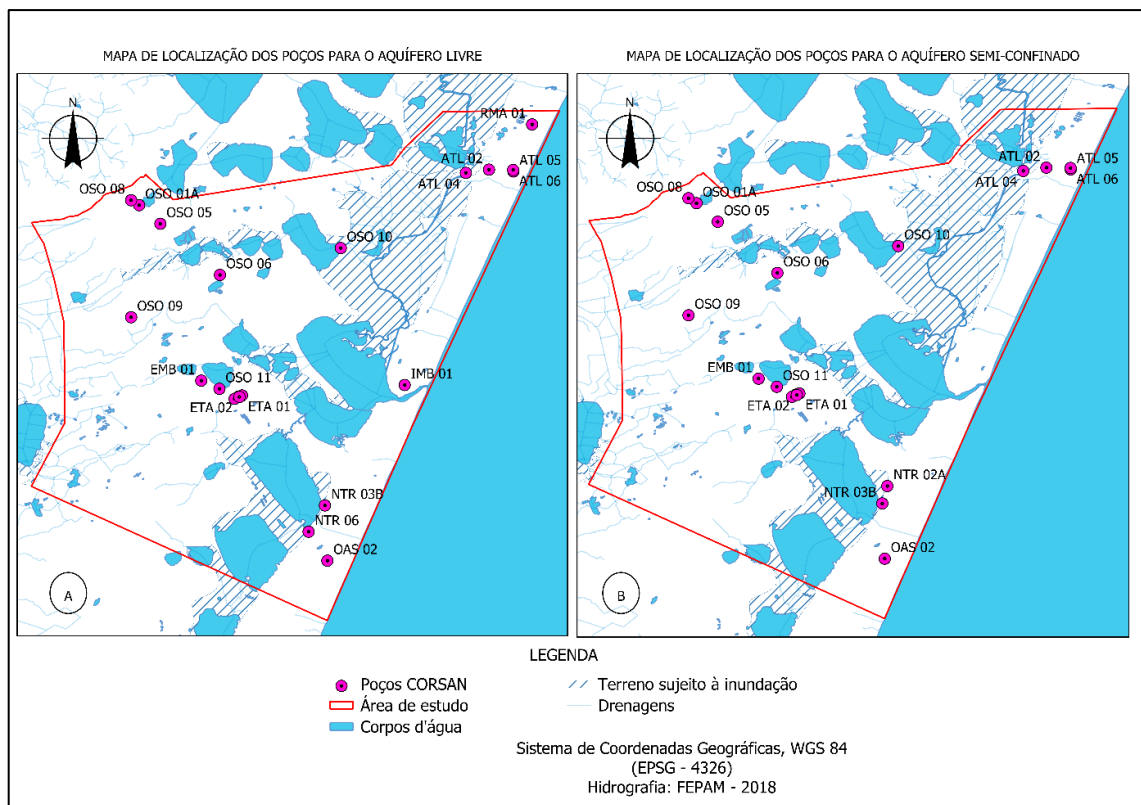
A análise de vulnerabilidade do SAC na área de estudo baseou-se na combinação de metodologias multicritério que integraram dados hidrogeológicos a partir dos perfis construtivos de poços, permitindo hierarquizar áreas mais ou menos suscetíveis à contaminação conforme a disponibilidade dos dados. Foram considerados os métodos GOD e DRASTIC, onde o primeiro oferece uma abordagem simplificada e eficiente para cenários com escassez de dados, enquanto o segundo proporciona uma análise mais robusta e detalhada ao integrar um número maior de critérios ponderados.

O método GOD baseia-se nos critérios de grau de confinamento do aquífero, materiais do estrato de cobertura e da profundidade do nível d'água, resultando em um índice entre 0 e 1 que expressa a vulnerabilidade natural à contaminação. Já o método DRASTIC incorpora mais critérios, incluindo recarga, solo, topografia e condutividade hidráulica, combinados por meio de pesos e classificações numéricas, produzindo um índice final que indica diferentes níveis de risco. Assim, enquanto o GOD se apresenta como uma alternativa prática e objetiva para estudos preliminares, o DRASTIC se mostra mais apropriado para análises aprofundadas, especialmente em áreas onde há maior disponibilidade e detalhamento espacial dos dados. Ambos os métodos convergem para o objetivo de mapear áreas suscetíveis, mas a escolha entre eles deve considerar o equilíbrio entre a complexidade da área de estudo e os recursos informacionais disponíveis.

Dessa forma, a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos livre e semiconfinado da área de estudo foi realizada a partir de uma análise multicritério baseada na integração de critérios presentes nos métodos GOD e DRASTIC em ambiente SIG utilizando o *software* QGIS®. A análise abrangeu os critérios disponíveis dos métodos citados, exceto os critérios D (profundidade do nível d'água), R (recarga), T (topografia) e C (condutividade hidráulica) do método DRASTIC. A decisão de não utilizar os critérios D e T deu-se pela baixa contribuição para discriminação da vulnerabilidade natural na área, incluindo maior ruído na análise multicritério, observado em testes de processamento. Enquanto os dados de entrada dos critérios R e C não se encontram disponíveis. Portanto, os critérios seis selecionados para análise formam o acrônimo GODASI.

Os dados de entrada utilizados como critério - como grau de confinamento, estrato de cobertura, profundidade do nível freático, material do meio aquífero, tipo de solo e material da zona não saturada - foram extraídos diretamente dos perfis geológicos construtivos dos poços tubulares utilizados para abastecimento da área em questão e, na sua ausência, fotos das amostras de calha, ambos disponibilizados pela Companhia Rio-grandense de Saneamento (CORSAN), atualmente privatizada e controlada pela empresa Aegea (Anexos 1 a 22). Tais dados serviram para compor a cartografia temática como banco de dados de entrada. Cabe ressaltar que a rede amostral dos poços não contemplou a totalidade de dados necessários para ambos os aquíferos na área de estudo, uma vez que alguns poços não permitiram uma identificação clara da camada aquífera Sal Grosso. A Figura 24 apresenta a localização dos poços considerados para o desenvolvimento deste estudo.

Figura 24: Mapas de localização dos poços distribuídos para a) aquífero livre; b) aquífero semiconfinado.



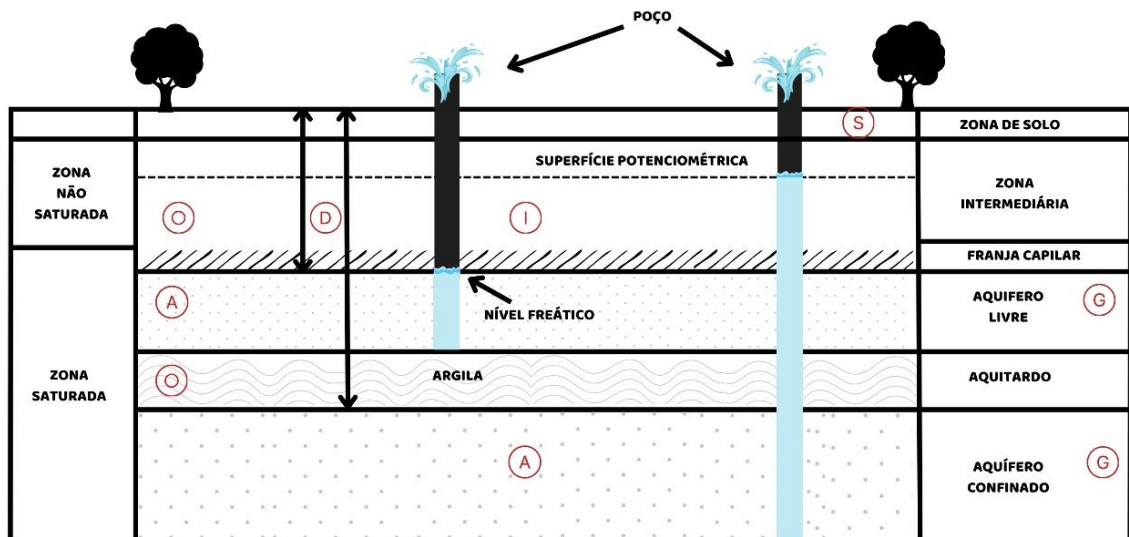
Fonte: autora.

O processo de geração dos mapas de vulnerabilidade natural dos aquíferos seguiu uma sequência de etapas em ambiente SIG, alinhando-se às aplicações dos métodos GOD e DRASTIC. As etapas metodológicas adotadas podem ser resumidas

em: (1) organização da base de dados de entrada, incluindo levantamento de dados de poços, e geração de superfícies por interpolação para composição de mapas temáticos correspondentes aos critérios G, O, D, A, S e I; (2) reclassificação das superfícies interpoladas com base nas pontuações definidas pelo método GOD (3) sobreposição ponderada dos critérios para geração do mapa final, de forma semelhante a ponderação realizada no método DRASTIC.

A Figura 25 esquematizada foi elaborada com intuito de ilustrar a abordagem metodológica adotada na diferenciação dos critérios hidrogeológicos para aquíferos livres e semiconfinados, estabelecendo a relação direta entre os critérios conceituais dos métodos e as camadas geológicas identificáveis em perfis construtivos de poços.

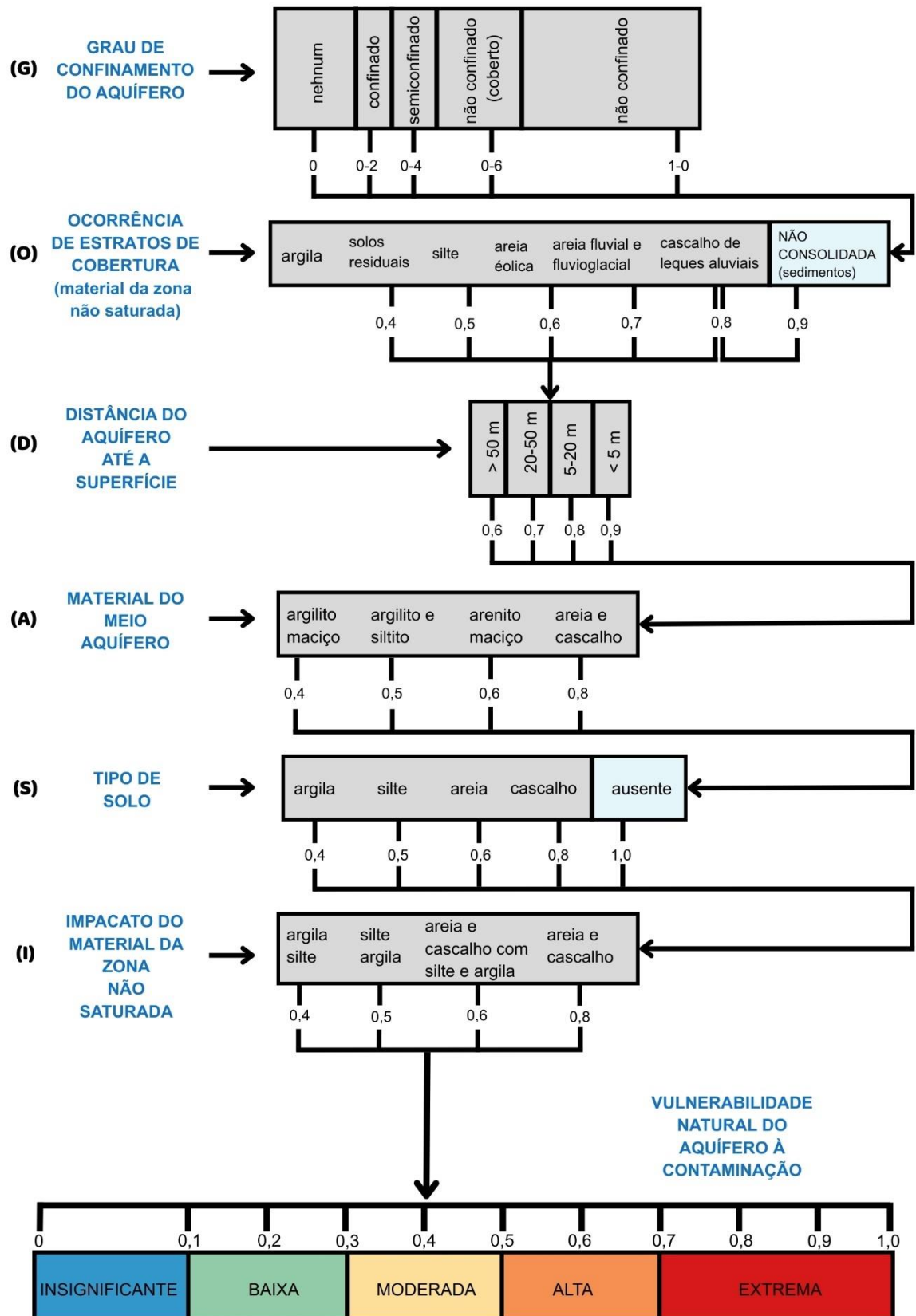
Figura 25: Representação esquemática fora de escala dos critérios do método GODASI.



Fonte: autora.

Ao adicionar mais critérios ao GOD, aumenta a resolução do estudo, mas também introduz mais camadas de subjetividade, já que a escolha dos pesos e a pontuação de cada critério introduzido e adaptado depende da interpretação. Essa subjetividade foi controlada através da bibliografia clássica das metodologias GOD e DRASTIC, tornando-se uma padronização metodológica. A metodologia empregada, de caráter híbrido, integra as faixas de índice (pontuação) do método GOD com a hierarquização e atribuição de pesos do método DRASTIC para a ponderação. A Figura 26 apresenta o esquema modificado para esta abordagem híbrida, onde a ponderação dos índices de cada critério é atribuída de acordo com as características da área de estudo.

Figura 26: Método GODASI para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos quaternários sedimentares.



Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2006) pela autora.

Uma vez pontuados os critérios e realizadas as etapas, procede-se ao cálculo do produto. Este índice determina a classe de vulnerabilidade do aquífero, a qual deve ser classificada segundo os intervalos de significância pré-estabelecidos em termos de vulnerabilidade, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27: Classes de vulnerabilidade em termos de significância.

VULNERABILIDADE	SIGNIFICADO
Insignificante 0,0 - 0,1	Caracteriza-se pela existência de formações geológicas impermeáveis que isolam o aquífero, impedindo que o fluxo vertical de água transporte poluentes.
Baixa 0,1 - 0,3	Apresenta risco apenas para substâncias persistentes (não biodegradáveis) sob condições de descarte prolongado e em larga escala, onde a lixiviação ocorre de forma persistente no tempo.
Média 0,3 - 0,5	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente em situações de exposição constante ou infiltração ininterrupta de resíduos no solo.
Alta 0,5 - 0,7	Vulnerável a muitos contaminantes, com exceção daquelas que possuem alta capacidade de fixação no solo ou que sofrem rápida degradação química, sendo sensível a diversos cenários de impacto ambiental.
Extrema 0,7 - 1,0	Vulnerável à maioria dos contaminantes com propagação de danos praticamente imediata e em múltiplos contextos de poluição, devido à baixa proteção natural do solo.

Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (1988).

6.1 Mapas Temáticos

Os dados pontuais, extraídos dos perfis geológicos construtivos dos poços da CORSAN, foram organizados em uma tabela de atributos contendo os valores mensurados ou estimados para cada critério utilizado. A etapa subsequente refere-se à interpolação espacial, etapa fundamental para transformar informações pontuais como dados de poços em superfícies contínuas representativas de toda a área de estudo. Optou-se pelo interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW) ou Ponderação pelo Inverso da Distância, desenvolvido por Shepard (1968), implementado no software QGIS®.

Entende-se que a interpolação por IDW é um método amplamente utilizado em geoprocessamento para estimar valores em locais onde não há medições diretas. Esse método parte do princípio da primeira lei da geografia de Tobler (1970), que postula que pontos localizados mais próximos entre si tendem a apresentar características semelhantes. Dessa forma, os valores desconhecidos são calculados

com base em uma média ponderada dos valores conhecidos nas proximidades, onde a influência de cada ponto amostral diminui à medida que aumenta a distância até o ponto a ser estimado, tipicamente segundo uma potência da distância.

A multiplicação dos valores atribuídos dos critérios pré-estabelecidos pode ser feita de duas formas: uma abordagem pontual, considerando os poços individualmente, ou uma abordagem espacializada, realizada pixel a pixel. O primeiro caso é similar ao procedimento adotado no trabalho de Trindade (2022), onde os valores dos critérios são atribuídos a cada poço, e a vulnerabilidade é calculada ponto a ponto. Em seguida, os resultados são interpolados para gerar uma superfície contínua. Essa técnica tende a concentrar maior detalhamento nos locais onde há poços, no entanto, pode limitar a representação das áreas onde não há dados diretos.

A segunda abordagem, mais espacialmente consistente (Gogu; Dassargues, 2000), é feita a multiplicação pixel a pixel, integrando informações rasterizadas. Por exemplo, o critério O (tipo de cobertura do aquífero) pode ser derivado de mapas geológicos do SGB (Serviço Geológico do Brasil), que apresentam essa informação em formato vetorial (polígonos). Nesse caso, recomenda-se rasterizar esse *shapefile*, atribuindo as pontuações correspondentes aos diferentes tipos de cobertura, de acordo com a legenda do método GOD, pois há informações que não dependem necessariamente, ou não se encontram, nos dados de descrição de poços (relacionados aos *shapefiles* de polígonos, como é o caso da cobertura).

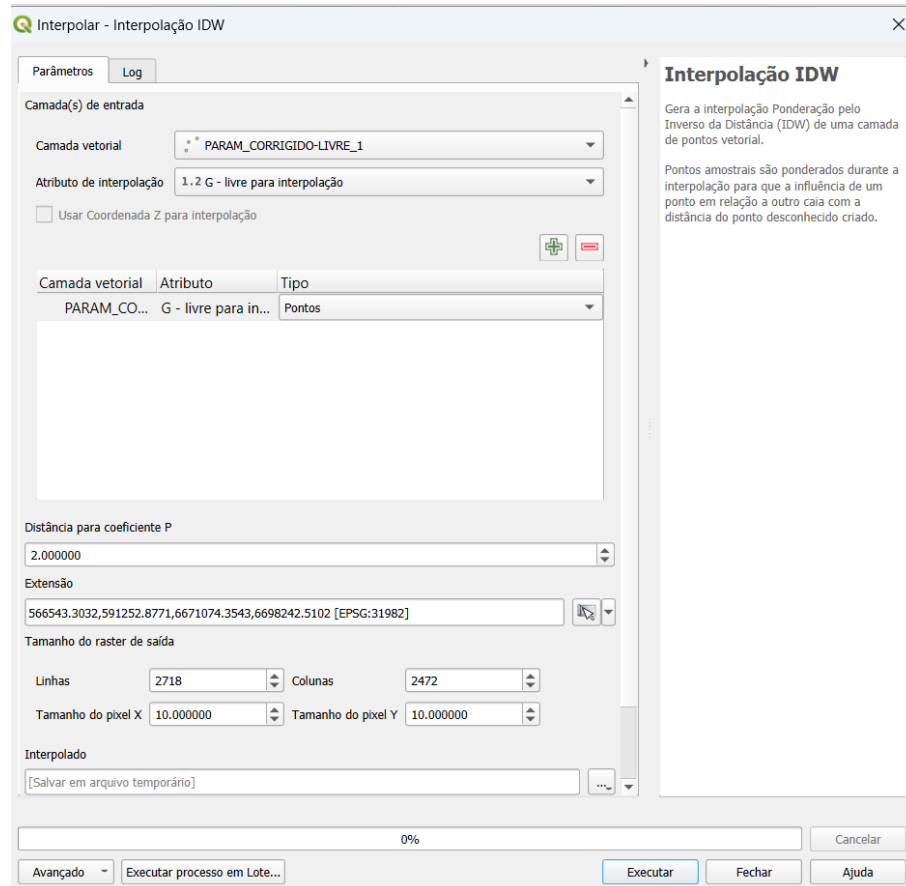
Essa metodologia pixel a pixel permite integrar dados pontuais e poligonais de forma mais equilibrada, resultando em um mapa de vulnerabilidade mais representativo da área de estudo. Ela se diferencia da abordagem que multiplica os valores de cada poço individualmente para obter um índice final e, em seguida, interpola esse índice para espacializar o resultado. Tal método gera um mapa que dá muita importância atribuindo pesos aos locais onde há poços (Foster; Hirata, 1988; Civita, 2010).

O produto da interpolação IDW é uma camada raster contínua com transições suaves entre os pontos, em que cada célula recebe um valor estimado com base na ponderação dos pontos amostrais ao redor. O método IDW é de simples aplicação devido às funções pré-determinadas, sendo bastante útil em análises iniciais ou em processos de interpolação espacial exploratória.

Esta escolha justifica-se pela sua adequação a fenômenos naturais que variam de forma gradual e contínua no espaço, como os critérios hidrogeológicos em estudo.

O IDW assume que a influência de um ponto amostral diminui com a distância, oferecendo um equilíbrio ideal entre simplicidade computacional, eficiência e aderência ao pressuposto de variação gradual dos atributos na área. No ambiente SIG, a interpolação (Figura 28) foi realizada utilizando o *shapefile* de pontos como camada de entrada, selecionando-se individualmente cada critério.

Figura 28: Configurações principais do interpolador IDW no QGIS®.



Fonte: QGIS® 3.42.3-Münster.

6.2 Reclassificação de Mapas Temáticos

Após a geração das superfícies contínuas para cada critério de entrada, procedeu-se à etapa de reclassificação. Este processo consistiu na conversão dos valores contínuos interpolados em valores discretos (pontuações), conforme as classificações preestabelecidas (Figura 26). Esta reclassificação atribuiu a cada critério individualmente um valor de pontuação que varia entre 0 e 1, representando uma escala de contribuição para a vulnerabilidade (Figura 27). Valores próximos a 0 indicam características que conferem menor vulnerabilidade, enquanto valores próximos a 1 representam características que conferem maior vulnerabilidade. Este

procedimento é essencial, pois traduz a magnitude observada de cada fator hidrogeológico em sua respectiva contribuição quantitativa para o índice de vulnerabilidade.

Portanto, os critérios na fase de construção do modelo foram todos integrados na mesma escala, criando-se um modelo híbrido, mantendo a proporcionalidade. Dessa forma, todos os critérios GODASI entraram no cálculo final já na mesma escala numérica de 0 a 1, resolvendo a incompatibilidade inicial entre as escalas dos métodos. A integração foi feita na fase de adaptação dos critérios, onde o mecanismo de normalização foi a tabela de pontuação do exemplo de aplicação do DRASTIC ao Sistema Aquífero Guarani. Como exemplo aqui, para o critério S, a classe argila recebe uma pontuação típica de 4. Para o modelo híbrido, este valor foi convertido para 0,4. Da mesma forma, uma classe com pontuação 10 foi convertida para 1,0. Os valores variam tipicamente de 1 a 10 para cada classe, então foram convertidas linearmente para a escala 0 a 1.

6.3 Mapa de Vulnerabilidade

Com todos os critérios convertidos em camadas de índices por meio da reclassificação, o mapa final de vulnerabilidade foi gerado pela aplicação da álgebra de mapas. Os índices (ou pontuações) de reclassificação com os valores numéricos entre 0 e 1 foram atribuídos a cada classe de um critério temático. Os pesos da álgebra de mapas com coeficientes ou regras matemáticas (geralmente de multiplicação ou soma ponderada) definem como as diferentes camadas temáticas reclassificadas devem ser combinadas para gerar o índice final, isto é, o cálculo é a pontuação multiplicada pelo peso. No ambiente do QGIS®, utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator* (Figura 29) para executar a soma ponderada dos mapas reclassificados.

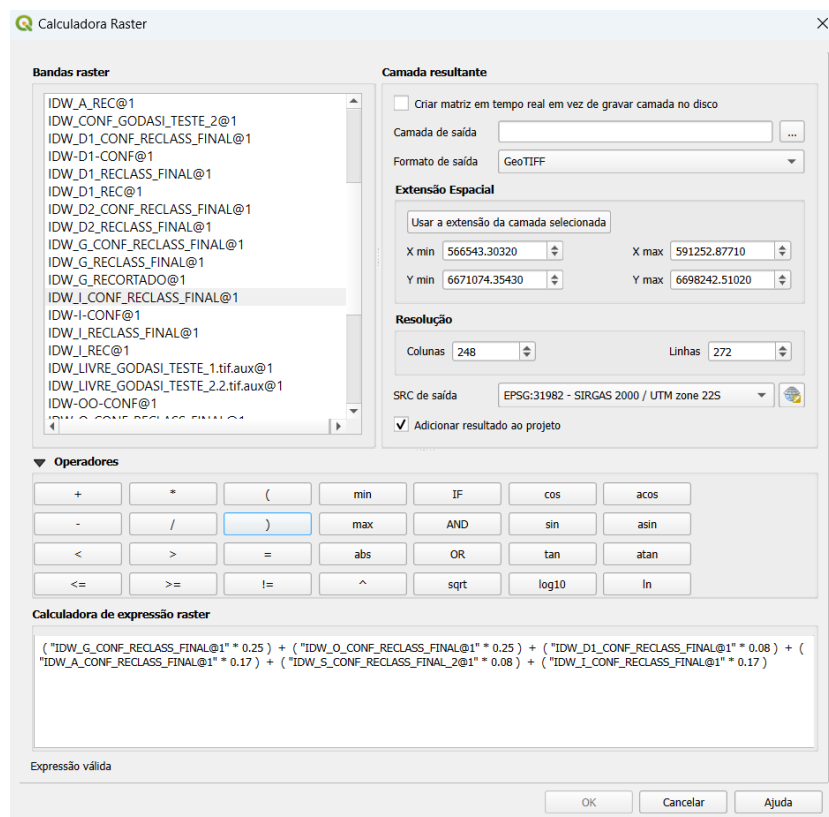
Nesta sobreposição utilizou-se o conjunto de seis critérios (G, O, D, A, S, I), onde foi arbitrada a seguinte lógica hierárquica entre os critérios, levando em consideração às particularidades da área de estudo. Esta hierarquia reflete as características geológicas e hidrogeológicas da área, sendo justificada pela variabilidade espacial observada em cada critério, cujos pesos atribuídos variam de 1 a 3: G - Tipo de aquífero (peso 3): recebeu peso máximo apesar de sua homogeneidade para ambos os sistemas, por representar o fator estrutural fundamental que condiciona os processos de vulnerabilidade; O - Estrato de cobertura (peso 3): também recebeu peso máximo devido à sua elevada variabilidade espacial

no aquífero livre, onde exerce controle direto na infiltração; I - Material da zona não-saturada (peso 2): por apresentar alta variabilidade, especialmente marcante no aquífero confinado, onde as características da camada confinante são críticas; A - Material do meio aquífero (peso 2), sendo considerado de importância moderada, pois apresentou pouca variação espacial para ambos os sistemas aquíferos; S - Tipo de solo (peso 1), por ser um critério superficial sua influência na vulnerabilidade é atenuada pela ação integrada dos fatores hidrogeológicos subjacentes de maior peso e D - Profundidade do nível freático (peso 1), pois se apresentou praticamente homogêneo para o aquífero livre e homogêneo para o semiconfinado.

Para tanto, foi aplicada a seguinte equação para a geração dos mapas finais de vulnerabilidade natural para os aquíferos livre e semiconfinado, normalizando o valor dos pesos atribuídos:

$$GODASI = (G * 0,25) + (O * 0,25) + (D * 0,08) + (A * 0,17) + (S * 0,08) + (I * 0,17)$$

Figura 29: Calculadora raster no software QGIS®.



Fonte: QGIS® 3.42.3-Münster.

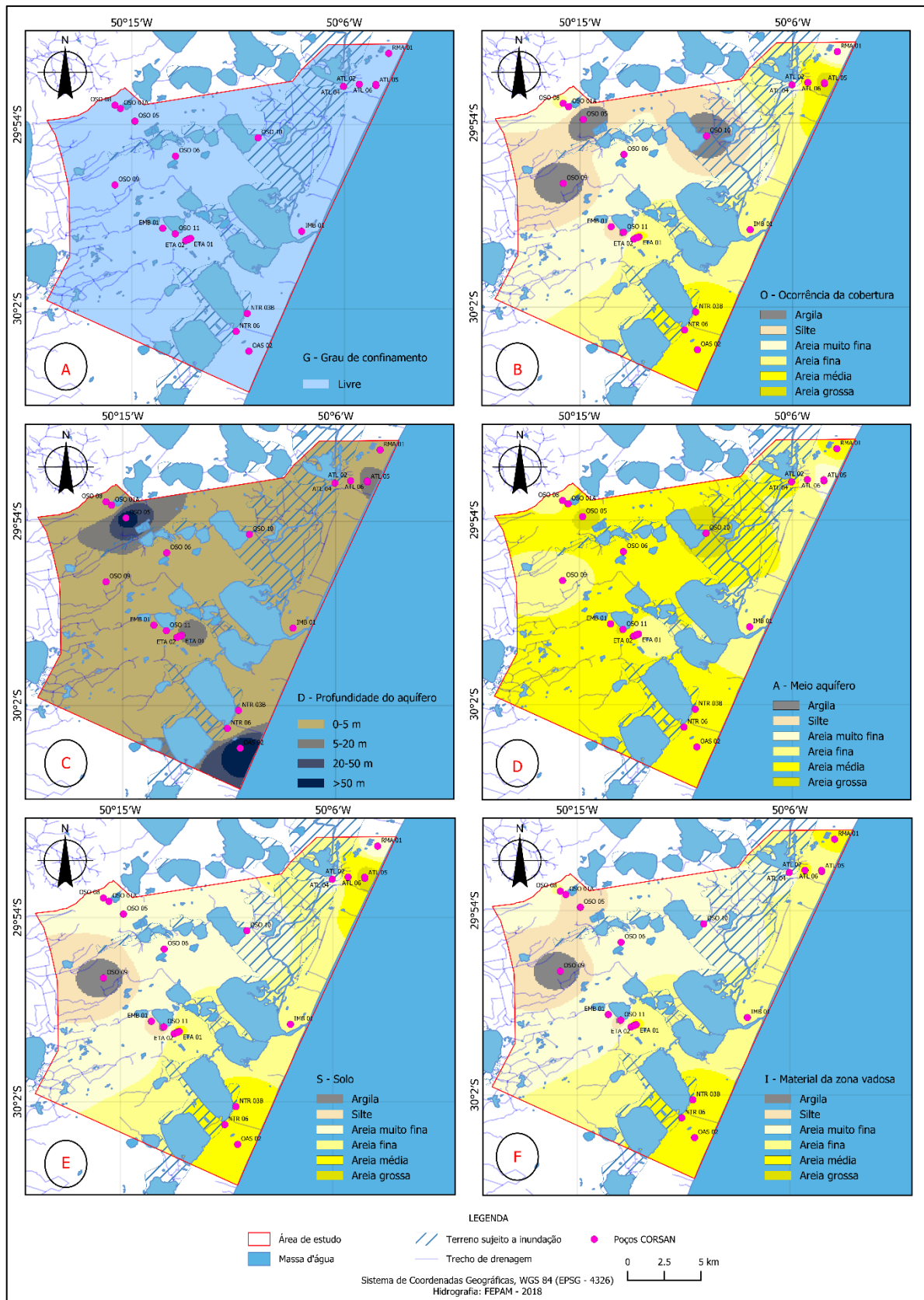
7 RESULTADOS

Os mapas temáticos que apresentam as superfícies contínuas geradas pela interpolação IDW para os critérios GODASI estão apresentados nas Figuras 30 e 31. A reclassificação realizada permitiu visualizar a distribuição espacial da vulnerabilidade para cada critério adotado.

Para o aquífero livre (Figura 32), a análise das superfícies reclassificadas revelou um comportamento distinto entre os critérios. Os critérios O, S e I apresentaram significativa variabilidade espacial, refletindo a heterogeneidade da planície costeira.

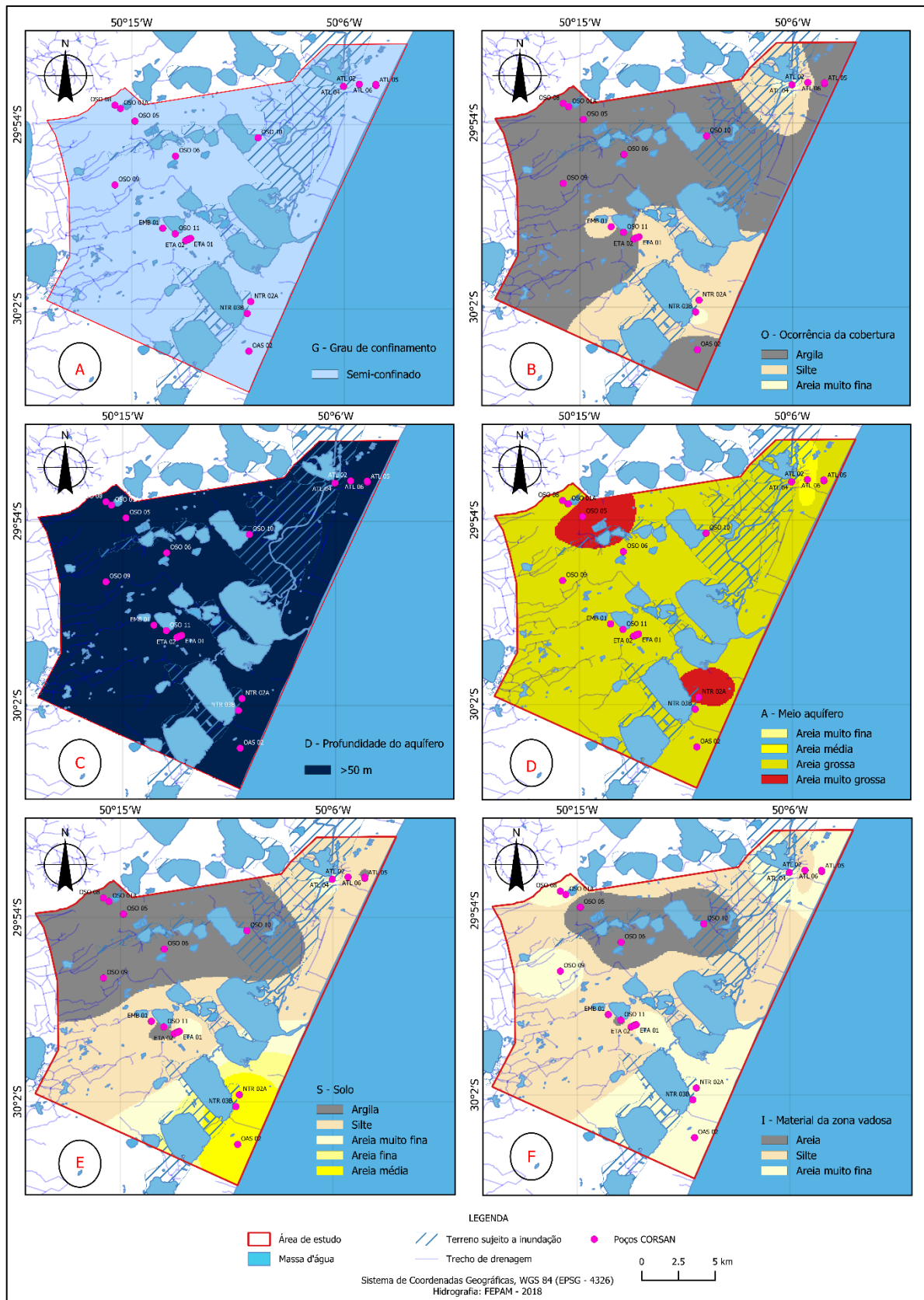
Para o aquífero semiconfinado (Figura 33) observou-se uma maior variação espacial nos critérios A, S e I, destacando a complexidade sedimentológica do aquífero propriamente dito e de sua cobertura. Em contraste, os critérios G, D e A de ambos aquíferos mostraram-se espacialmente homogêneos, indicando condições hidrogeológicas uniformes em escala regional.

Figura 30: Mapas interpolados de cada critério (GODASI) para o aquífero livre (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A - Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada.



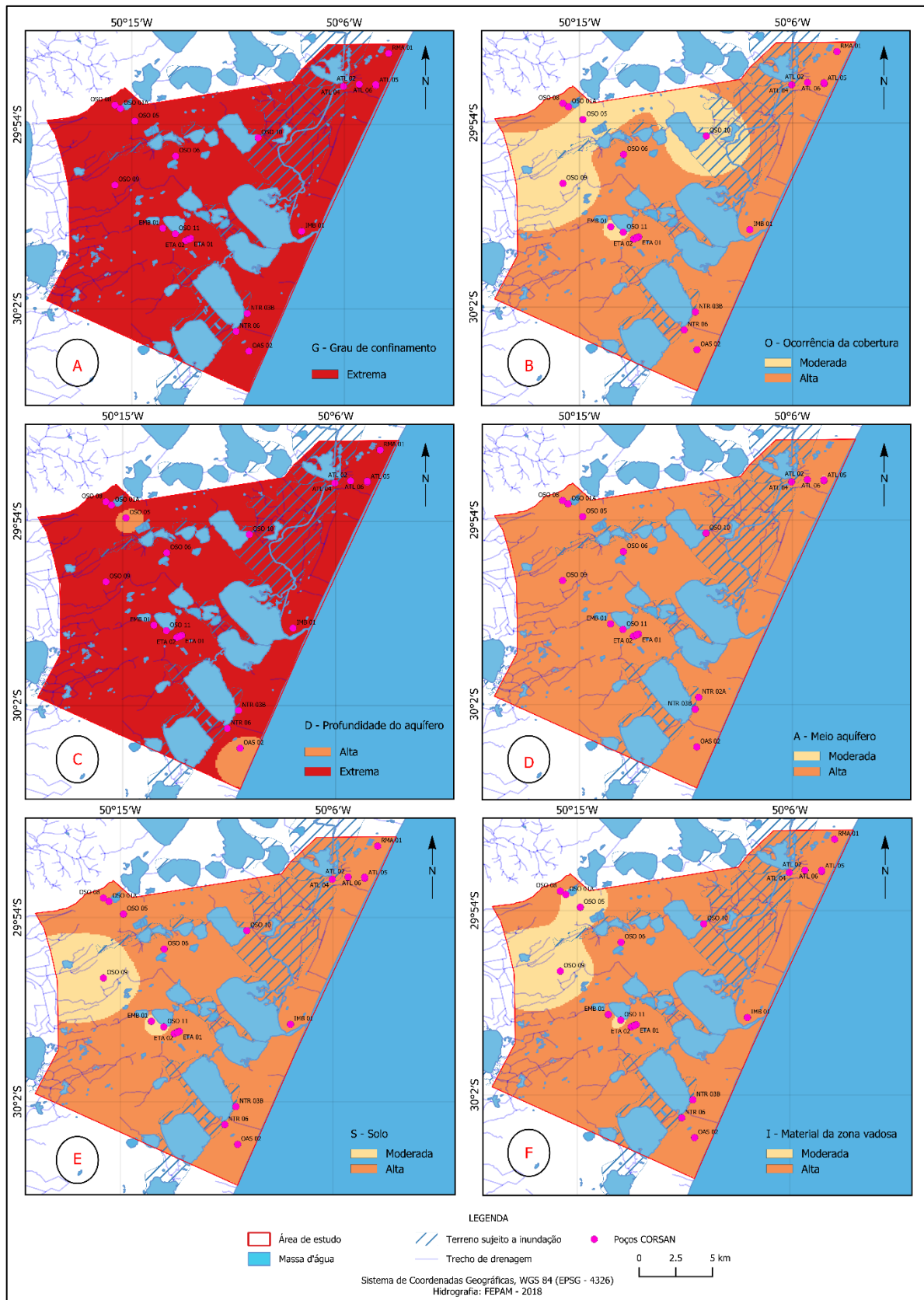
Fonte: autora.

Figura 31: Mapas interpolados de cada critério (GODASI) para o aquífero semiconfinado. (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A - Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada.



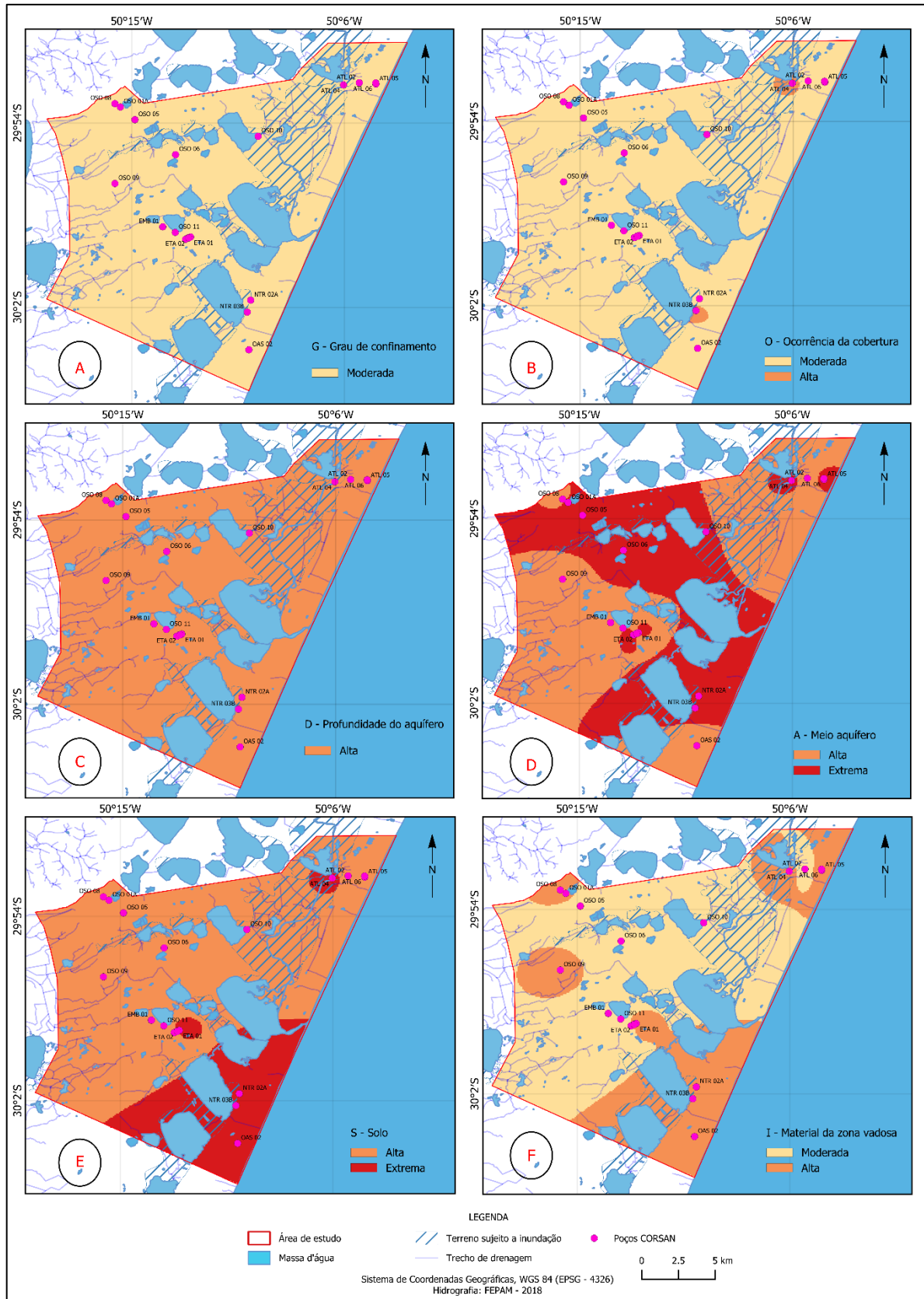
Fonte: autora.

Figura 32: Mapas reclassificados de cada critério (GODASI) para o aquífero livre (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A - Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada.



Fonte: autora.

Figura 33: Mapas reclassificados de cada critério (GODASI) para o aquífero semiconfinado (A) G - Tipo de aquífero; (B) O - Estrato de Cobertura; (C) D - Profundidade do nível freático; (D) A - Material do meio aquífero; (E) S - Tipo de solo; (F) I - Material da zona não-saturada.



Fonte: autora.

A Figura 34 apresenta os critérios utilizados, seus pesos originais, os pesos normalizados, o índice obtido para cada aquífero e a classe de vulnerabilidade correspondente. A coluna 'pesos recálculo' apresenta os pesos normalizados, ou seja, convertidos em uma proporção cuja soma total é igual a 1, necessário para realizar a soma ponderada final na álgebra de mapas. O índice obtido para cada aquífero foi extraído do raster final de vulnerabilidade.

Figura 34: Resultado da aplicação GODASI com os pesos utilizados, recalculados e os índices de vulnerabilidade obtidos para os dois sistemas aquíferos estudados.

AQUÍFERO LIVRE				
PARÂMETROS	PESOS	PESOS RECÁLCULO	ÍNDICE OBTIDO	CLASSE
G	3	0,25	MÍNIMO 0,616	ALTA
O	3	0,25		
D	1	0,08		
A	2	0,17		
S	1	0,08	MÁXIMO 0,749	EXTREMA
I	2	0,17		
SOMA	12	1		

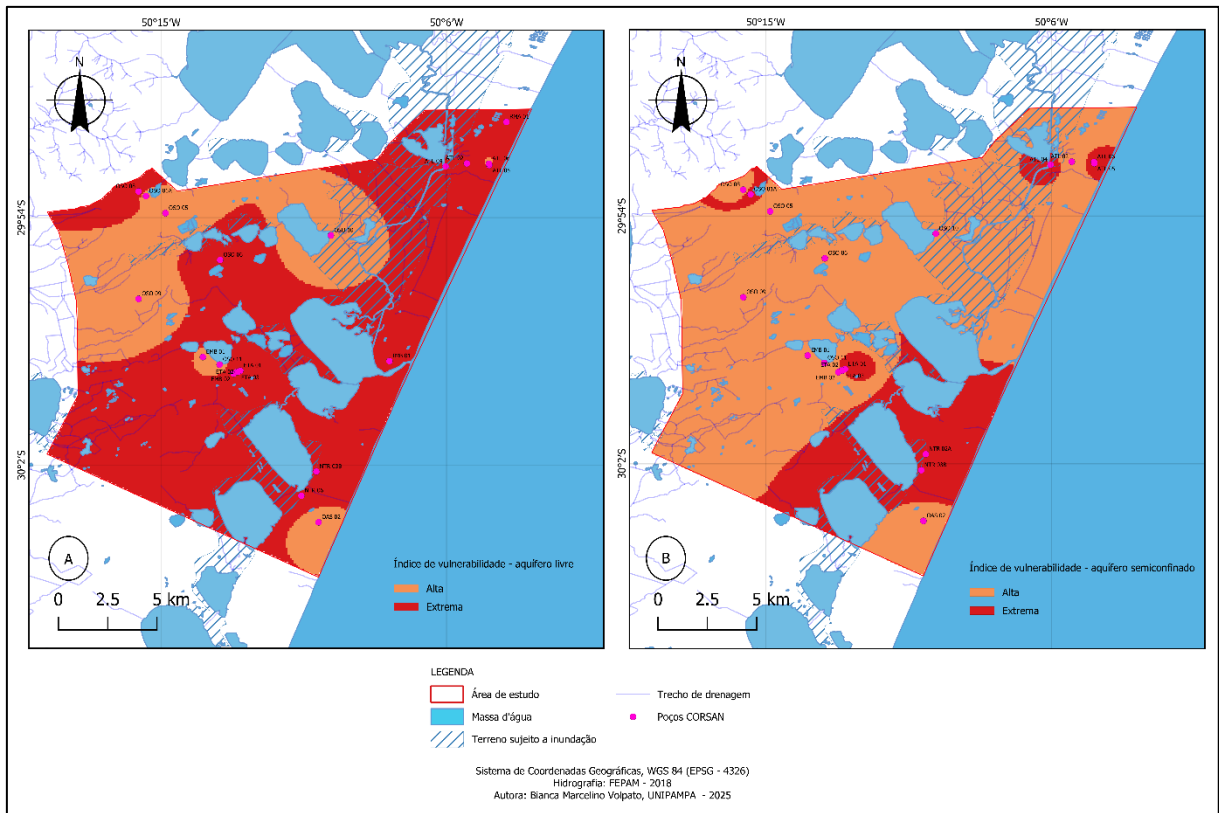
AQUÍFERO SEMI CONFINADO				
PARÂMETROS	PESOS	PESOS RECÁLCULO	ÍNDICE OBTIDO	CLASSE
G	3	0,25	MÍNIMO 0,6	ALTA
O	3	0,25		
D	1	0,08		
A	2	0,17		
S	1	0,08	MÁXIMO 0,734	EXTREMA
I	2	0,17		
SOMA	12	1		

Fonte: autora.

O índice de vulnerabilidade para o aquífero livre variou entre 0,616 e 0,749. Este intervalo, conforme a metodologia GOD, posiciona a vulnerabilidade do sistema entre as classes alta e extrema. Para o aquífero semiconfinado, o índice varia entre 0,6 e 0,734. Assim como no aquífero livre, o intervalo abrange as classes alta e extrema, contudo, esses índices apresentam distribuições diferentes.

A aplicação da álgebra de mapas com a equação GODASI resultou na geração de dois mapas temáticos finais de vulnerabilidade natural: um para o aquífero livre e outro para o aquífero semiconfinado (Figura 35).

Figura 35: Mapa de vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero livre (A) e aquífero semiconfinado (B).



Fonte: autora.

Para o aquífero livre, observou-se o predomínio de vulnerabilidade extrema a alta, associada a áreas de menor profundidade do nível freático e solos mais permeáveis com areia muito fina a média. Em termos de abrangência, a vulnerabilidade extrema representa 82,28 % da área de estudo, enquanto 17,72 % da área apresenta vulnerabilidade alta.

Para o aquífero semiconfinado, observou-se o predomínio de vulnerabilidade alta, abrangendo cerca de 83,63 % da área de estudo, limitando a ocorrência da classe mais crítica (extrema) em cerca de 16,37 % da área. A redução das áreas de vulnerabilidade extrema do aquífero semiconfinado, quando comparadas com o aquífero livre, está diretamente associada ao efeito protetor da camada confinante com maior conteúdo de silte e argila, e pela maior profundidade do aquífero. Enquanto o aquífero livre tem menor proteção natural contra poluentes da superfície, portanto, é muito mais vulnerável a contaminações.

8 DISCUSSÃO

Os mapas gerados pela metodologia GODASI evidenciam padrões espaciais de vulnerabilidade condizentes com a geologia e hidrogeologia conhecidas da PCRS. O predomínio de vulnerabilidades alta e extrema nos aquíferos livre e semiconfinado, evidenciam o elevado risco de infiltração de contaminantes associados às pressões antrópicas atuais. Segundo Foster (1998) e Foster *et al.* (2002), classes elevadas de vulnerabilidade estão sujeitas a múltiplos tipos de contaminantes como hidrocarbonetos clorados e não-clorados, sais e nitrato. Torna-se ainda mais agravante pela fragilidade da gestão de saneamento básico regional e da perspectiva de novos projetos de lançamento de efluentes sobre os sistemas lagunares. Esse cenário representa uma ameaça à qualidade das águas superficiais e dos aquíferos, principalmente em sua fase livre, podendo atingir o aquífero semiconfinado.

De modo geral, a classe de vulnerabilidade extrema se estende por grande parte do perímetro da área de estudo para o aquífero livre, cerca de 82,28%, resultado direto e esperado do contexto hidrogeológico costeiro. A unidade UH-1 (Troian *et al.*, 2020), correspondente ao aquífero livre, apresenta vulnerabilidade naturalmente alta devido ao nível freático muito próximo da superfície e a baixa capacidade protetora da zona não saturada. Esta condição, somada à sedimentologia predominantemente arenosa e siltosa dos sistemas deposicionais analisados, cria um cenário propício à rápida infiltração e disseminação de contaminantes (Hirata; Fernandes, 2008).

A relação entre os índices de vulnerabilidade alta e extrema no aquífero semiconfinado (UH-3) ressalta a função das camadas argilosas e siltosas (UH-2 e UH-4) como barreiras naturais à percolação vertical nos sistemas laguna-barreira. Estas unidades, caracterizadas por Troian (2020) como pacotes predominantemente argilosos com intercalações de areia fina, atuam como aquitardos no Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC), constituindo o principal fator de redução de risco.

Contudo, a distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero semiconfinado apresenta certa variabilidade entre os principais sistemas deposicionais da região. No Sistema de Barreira III, os poços localizados nesta feição, como o ETA 1, apresentam índices de vulnerabilidade extremas. A associação direta com este sistema deposicional explica os valores altos, uma vez que a sedimentologia característica da Barreira III, composta por areia fina a muito fina e silte, oferece menor resistência à percolação e ao transporte de contaminantes.

No Sistema de Barreira IV os poços como ATL 05 e ATL 06 também se destacam por sua vulnerabilidade extrema. A composição sedimentar típica da Barreira IV, semelhante à da Barreira III, contribui para a redução da capacidade de atenuação natural do meio.

No Sistema Lagunar IV os poços ATL 04, NTR 02A e NTR 03B, situados neste compartimento, igualmente registram índices de vulnerabilidade extrema. Embora a natureza predominante dos sedimentos lagunares possa sugerir uma redução na vulnerabilidade, o índice observado para esses poços é, provavelmente, em decorrência as lagoas muito próximas dos poços, favorecendo a migração vertical e lateral de poluentes.

Ao confrontar os resultados obtidos com os estudos de Trindade (2022) e Camargo (2016), observa-se uma progressão no grau de vulnerabilidade que acompanha tanto a variação geográfica quanto o refinamento metodológico empregado. Camargo (2016) identificou o predomínio de vulnerabilidade alta de 85% para o sistema livre em Palmares do Sul, e Trindade (2022) registrou 61% de vulnerabilidade alta na região de Balneário Pinhal e Cidreira, enquanto o presente estudo revelou um cenário mais crítico, com 82,28% da área do aquífero livre classificada sob vulnerabilidade extrema.

Essa discrepância de resultados tem relação com o maior grau de importância (pesos) atribuída aos critérios G e O, aliada à integração dos critérios A, S e I. Tal sensibilidade analítica é fruto da metodologia híbrida GOD + ASI, capturando riscos que poderiam ser subestimados por análises menos abrangentes. Essa abordagem multicritério viabilizou nuances críticas de vulnerabilidade que o método GOD, de caráter mais generalista, pode subestimar.

No aquífero semiconfinado, essa diferença é ainda mais acentuada: Camargo (2016) apontou predomínio de vulnerabilidade de 52% como baixa e 48% como insignificante, e no estudo de Trindade (2022) evidenciou predomínio de vulnerabilidade média de 73%. Os resultados aqui apresentados indicam que a proteção exercida pelas camadas confinantes é insuficiente para retirar o sistema da classe de vulnerabilidade alta (83,63%), possivelmente relacionado à camada confinante mais frágil por descontinuidades nas lentes argilosas ou maior percolação vertical sob os sistemas lagunares – inda que a presença das lagoas não tenha sido considerada na análise.

A transição latitudinal em direção ao norte da PCRS parece revelar uma diminuição na capacidade de atenuação de contaminantes pelas camadas superficiais. Contudo, a aparente superestimação da vulnerabilidade encontrada neste estudo de caso tem relação direta com a abordagem híbrida aplicada. O método GODASI demonstrou que a vulnerabilidade na área de estudo, na realidade, é mais crítica do que o sugerido por aplicações simplificadas em áreas adjacentes. Considerando o gerenciamento integrado dos recursos hídricos costeiros, uma abordagem que considere um número maior de critérios ponderados e baseados em dados diretos (perfis de poços), pode ser uma alternativa mais segura para estimar a vulnerabilidade dos aquíferos, adotando uma postura mais “conservadora” no que diz respeito a proteção dos recursos hídricos.

Neste contexto, o GODASI mostrou-se uma ferramenta interessante para integrar os dados disponíveis, permitindo uma avaliação um pouco mais refinada, incorporando ao método GOD a influência de aspectos críticos em aquíferos sedimentares costeiros, como do material do meio aquífero, do solo e do impacto da zona não saturada, aliadas a ponderação de critérios do método DRASTIC,

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da análise multicritério foi fundamental para identificar e espacializar as áreas com maior vulnerabilidade natural à contaminação, revelando padrões claramente associados à geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, como o esperado.

Apesar de sua ampla utilização, o método IDW apresenta algumas limitações quanto à precisão dos resultados, que depende fortemente da distribuição espacial dos pontos amostrais. Em distribuições irregulares, o resultado pode levar a áreas com interpolação menos confiável. Além disso, o método não gera valores máximos ou mínimos além dos que estão presentes nos dados amostrados, o que pode ocasionar a formação de picos ou depressões artificiais ao redor dos pontos de entrada. Contudo, é importante destacar uma limitação inerente ao método de interpolação e à distribuição espacial dos dados de entrada. Os limites entre as classes de vulnerabilidade nos mapas finais não estão nitidamente definidos, apresentando transições suaves. Isto é uma consequência direta do espaçamento entre os poços de monitoramento, que, ao serem interpolados, fazem com que a característica textural e, por consequência, a vulnerabilidade, de um ponto específico exerça influência sobre uma área extensa ao seu redor. Embora este comportamento seja coerente com o pressuposto de variação gradual dos critérios, ele pode suavizar transições geológicas abruptas conhecidas na região. Portanto, os mapas devem ser interpretados como uma representação regional da tendência de vulnerabilidade, cuja resolução é condicionada pela rede de poços amostrais.

Os mapas produzidos não apenas identificam as zonas de maior risco na área de estudo, mas também validam a aplicabilidade de metodologias integradas para a avaliação de vulnerabilidade em aquíferos costeiros, podendo servir como um instrumento complementar para orientar a gestão de recursos hídricos e definição de zonas de proteção de aquíferos, priorizando ações de monitoramento de poços e controle de atividades potencialmente poluidoras nas áreas classificadas com vulnerabilidade alta e extrema. Contudo, para aprimorar ainda mais essa análise e potencializar seu uso na gestão hídrica regional, indica-se a integração de novas camadas temáticas relacionadas às pressões antrópicas diretas e incorporar o mapeamento das fontes potenciais de contaminação, como proposto por Trindade (2022), para avaliar risco de contaminação.

REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H. & PETTY, R. J. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/2-85/018. 29 p, 1987.
- AGUERO, J.; PUJOL, R. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica**, 2002. Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/276989081>>. Acesso em: 11 set. 2024.
- BARBOZA, E. G. et al. **Sistemas deposicionais e evolução geológica da planície costeira entre La Coronilla e Cabo de Santa Marta (Bacia de Pelotas): uma revisão**. In: JELINEK, A. R.; SOMMER, C. A. (Org.) Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Geologia, Porto Alegre, 2021. p. 455-468.
- BATISTA, C. S. P. *et al.* **Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica**, 2017. Disponível em <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28686>>.
- BRACK, P. **Vegetação e paisagem do litoral norte do Rio Grande do Sul: patrimônio desconhecido e ameaçado**. ENCONTRO SOCIOAMBIENTAL DO LITORAL NORTE DO RS, v. 2, p. 46-71, 2006.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, 1998.
- CAMARGO, P. S. S. **Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Palmares do Sul (RS)**. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Ambiental - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/256833>>.
- CIVITA, M. V. **The combined approach when assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination**. Journal of Water Resource and Protection, v. 2, n. 1, p. 14-28, 2010.
- COLLISCHONN, L. **Gênese e ocorrência da camada aquífera “Sal Grosso” no litoral norte do Rio Grande do Sul**, UFRGS, 2018.
- COLLISCHONN, L. **Gênese e estratigrafia do aquífero “Sal Grosso”, litoral norte da planície costeira do Rio Grande do Sul**, UFRGS, 2021.
- COLLISCHONN, L.; ROSA, M. L. C. **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, v. 116, p. 103801, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103801>

CORRÊA, I. C. S. *et al.* **Plataforma continental do Rio Grande do Sul, 2019.** Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/337800477>>. Acesso em 08 dez de 2024.

DELANEY, P. J. V. **Fisiografia e geologia de superfície da planície costeira do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Geologia Geral). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1962. DOI:10.11606/T.44.2016.tde-29082016-151600. Acesso em: 22 nov. de 2024.

DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. 2000. **Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by shoreface translation-barrier model (STM).** Journal of coastal research, 16(1): 71-81.

DILLENBURG, S. R. *et al.* **Modificações de Longo Período da Linha de Costa das Barreiras Costeiras do Rio Grande do Sul.** Gravel, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 9-14, 2005.

EMBRAPA. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul,** 2012.

FALHEIROS, M. O.; CARNEIRO, J. P. H.; FRANCO NETO, E.; CARDOSO, A. D. **Utilização do método GOD para a avaliação de vulnerabilidade dos aquíferos das cidades de Boquim-SE e Riachão do Dantas-SE.** XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, Água para todos: não deixar ninguém para trás, 2019.

FEPAM. **Geoprocessamento: BCRS25 - Hidrografia,** 2018. Disponível em: <<https://www.fepam.rs.gov.br/geoprocessamento>>. Acesso em: 25 nov. 2025.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater.** Prentice Hall. 1979

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** 4^a ed. New Jersey, EUA. Prentice Hall. 2001.

FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas.** Tradução Daniel Vieira. 2. ed. Rio De Janeiro: Editora Elsevier, 2015.

FRANÇA, A. C. R. *et al.* **Diagnóstico do comitê de bacia hidrográfica do Rio Tramandaí do estado do Rio Grande do Sul.** Natural Resources, v.12, n.1, p.91-103, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2022.001.0009>.

FOSTER, S.; HIRATA, R. 1988. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p.

_____. **Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview.** In: ROBINS, N.S. (Ed.) Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability. London: Geological Society, 1998. p. 7-22. (Geological Society Special Publication, 130).

FOSTER, S. *et al.* **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environmental agencies.** Washington: World Bank Group, 2002. 105 p.

FOSTER, S. *et al.* **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Washington: World Bank Group, 2006. Edição Brasileira Sevmar. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/211991468005114562/pdf/250710REVISSED01R01OFFICAL0USE0ONLY1.pdf>>.

GAUER, N. P. **Avaliação da vulnerabilidade ambiental por meio de um modelo de análise multicritério no norte da planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil.** Monografia em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. IMBÉ, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/140082>>.

GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. **Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods.** Environmental Geology, v. 39, n. 6, p. 549-559, 2000.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra.** 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2023.

HAUSMAN, A. **Estudo das Possibilidades da Água Subterrânea no Rio Grande do Sul,** Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 1960. Disponível em: <http://boletim.siteoficial.ws/pdf/1960/9_1-26-39.pdf>. Acesso em 08 dez. de 2024.

HEMSI, P. S. **Transporte de poluentes nos solos: com exercícios resolvidos usando soluções analíticas.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2024.

HIRATA, R. **Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos.** Protección de Acuiferos Frente a La Contaminacion: Metodologia. Toluca, México, jun. 2001.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. **Vulnerabilidade à poluição de aquíferos.** In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Capítulo 5.4 p. 405-424.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas no Estado de São Paulo.** Cadernos de Educação Ambiental, 3ª ed., SMA - Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 2014. Disponível em <<https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2901>>.

LI, J.; HEAP, A. D. **A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors.** Ecological Informatics, v. 23, p. 47-58, 2014.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul.** [s.l.], p. 1, 2005.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil,** 2024. Disponível em <<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>. Acesso em: 23 de nov. de 2024.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J.R.T. **O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul.** Agrometeoros, v.25, n.2, p. 323 - 33, 2017.

MANOEL FILHO, J. **Evolução Histórica do Conhecimento**. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008a. Capítulo 1.1 p. 5-12.

MARTINS, D. C. et al. **Ocorrência de Ophiomorpha nodosa em sedimentos pleistocênicos da Planície Costeira da Pinheira, Santa Catarina, Brasil**. Rev. Bras. de Paleontologia, 2018. 21(1): 79-86.

_____. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008b. Capítulo 2.1 p. 53-75.

MESTRINHO, S. S. P. **Geoquímica das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Capítulo 5.2 p. 359-379.

PEDROSA, R. et al. **Vulnerabilidade Natural à Contaminação de aquíferos da região metropolitana do Recife - PE**. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS. Disponível em: <<https://files.abrhydro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0718-1-20190505-103925.pdf>>.

PEREIRA CABRAL, J. J. S. **Movimento das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Capítulo 2.2 p. 77-91.

REBOUÇAS, A. C. **Groundwater in Brazil**. Episodes, Canadá, v. 11, n. 3, p. 209-214, 1988.

_____. **Importância da água subterrânea**. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Capítulo 1.2 p. 13-29.

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

SANTOS, V. L. C. **Banco de dados ambientais da Bacia de Pelotas: uma ferramenta para elaboração de estudos de impacto ambiental**. Universidade Federal do Rio Grande, FURG, 2009.

SEMA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Produtos Parciais, Final e Relatório Síntese**. SEMA, 2003. Disponível em: <https://www.mprs.mp.br/media/areas/paibh/arquivos/plano_bacia_hidrografica_rio_tramandai.pdf>.

SHEPARD, D. **A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data**. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, New York, 27-29 August 1968. New York: ACM, 1968, p. 517-524.

TOBLER, W. R. **A computer movie simulating urban growth in the Detroit region.** *Economic Geography*, v. 46, p. 234-240, 1970.

TOLDO JR, E. E. *et al.* **O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul.** *Pesquisas em Geociências*, 2006. 33(2): p. 35-42.

TOMAZELLI, L.; VILLWOCK, J. **Geologia do Sistema Lagunar Holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil.** *Pesquisas em Geociências*, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 13-24, 1991. DOI: 10.22456/1807-9806.21358. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/21358>>. Acesso em: 22 nov. de 2024.

TOMAZELLI, L.; VILLWOCK, J. **O Cenozóico Costeiro do Rio Grande do Sul.** In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (eds). *Geologia do Rio Grande do Sul*. P. 375-406, 2000.

TOMAZELLI, L. J. *et al.* **Sistemas deposicionais e Evolução Geológica da Planície Costeira do Rio Grande do Sul: Uma Síntese.** In: Frantz, J. C. & Iannuzzi, R. (Eds.). *50 Anos de Geologia no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, CIGO, IG-UFRGS*, v. 1, 2007, p. 327-339.

TRINDADE, S. **Análise da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero costeiro na região de Cidreira e Balneário Pinhal, RS.** UFRGS, 2022.

TROIAN, G. C. *et al.* **Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande Do Sul.** *Águas Subterrâneas*, v. 34, n. 3, p. 264-274, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v34i3.29883>.

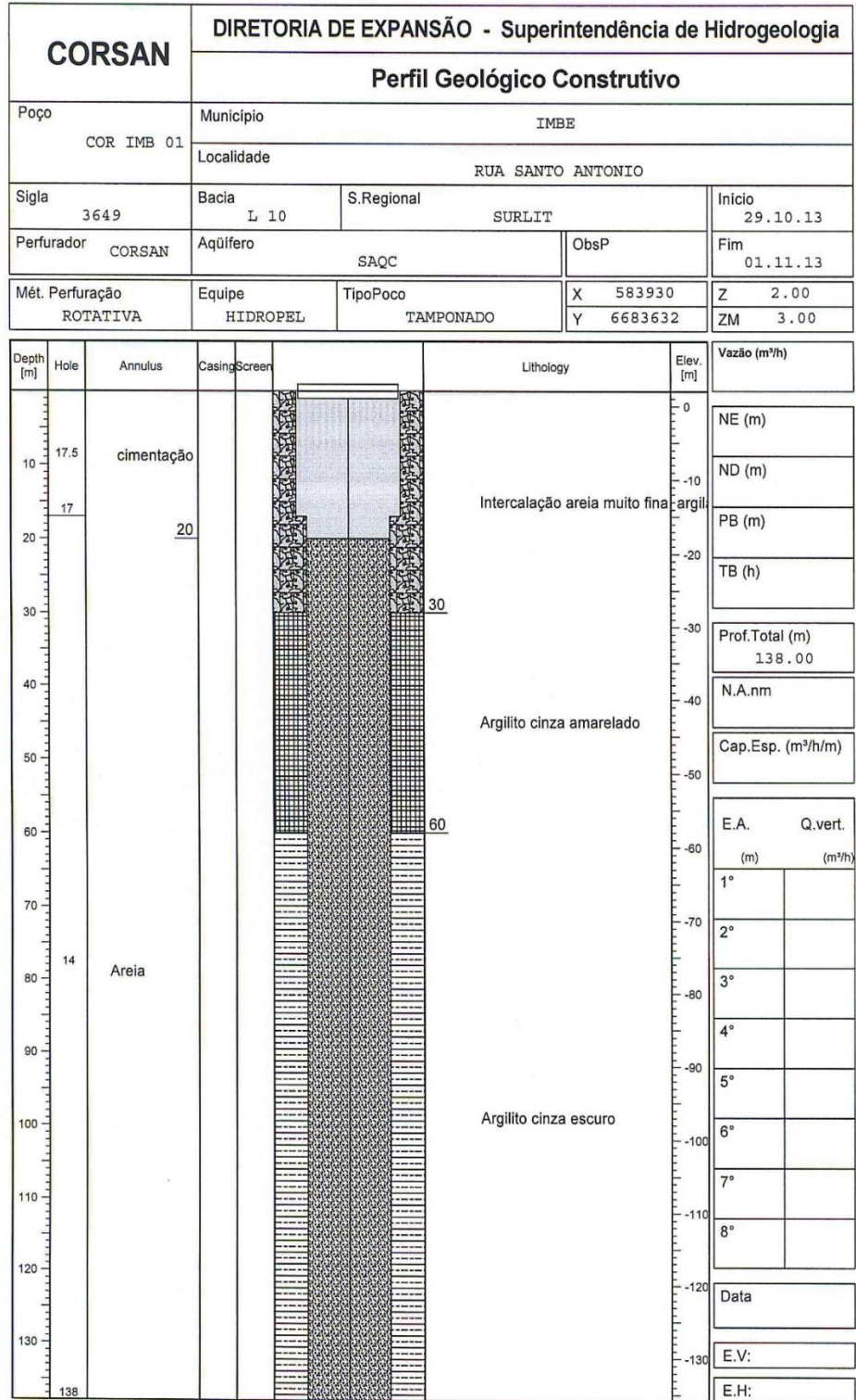
TROIAN, G. C. **Compartimentação Hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Costeiro no Estado do Rio Grande do Sul**, UFRGS, 2021.

VILLWOCK, J. A. **Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. A Synthesis.** *Pesquisas Em Geociências*, 1984. 16(16), 5-49. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21711>.

WICANDER, R.; MONROE, J. **Geologia.** [s.l: s.n.]. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2017.

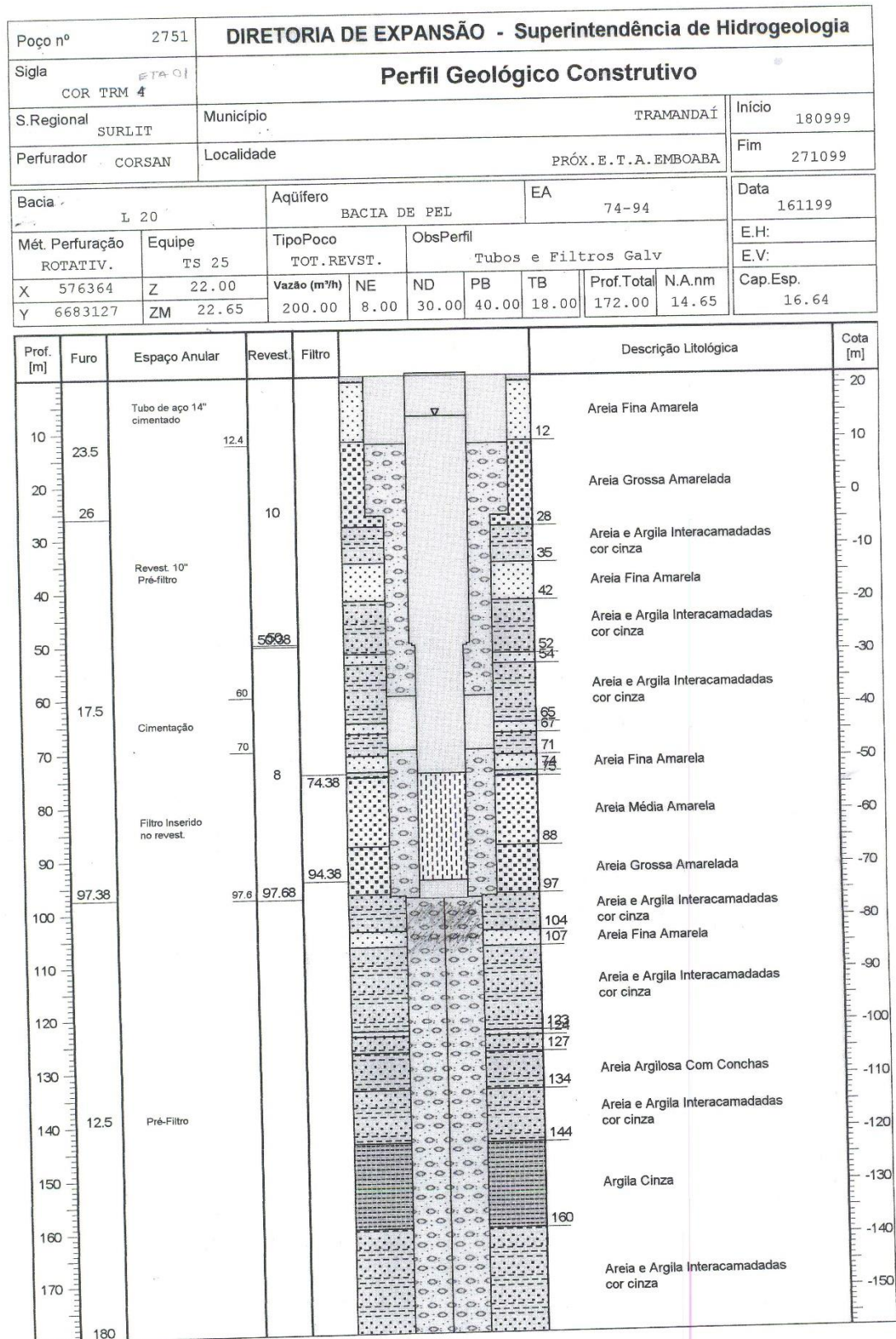
ANEXOS

Anexo 1: Perfil construtivo do poço IMB 01.




Fonte: CORSAN.

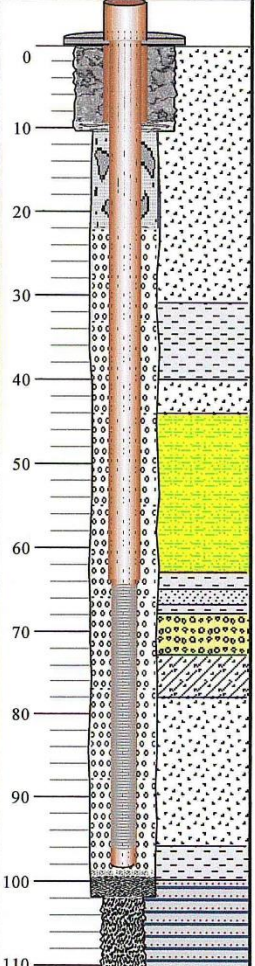
Anexo 2: Perfil construtivo do poço ETA 01.



Fonte: CORSAN.

Anexo 3: Perfil construtivo do poço ETA 02.

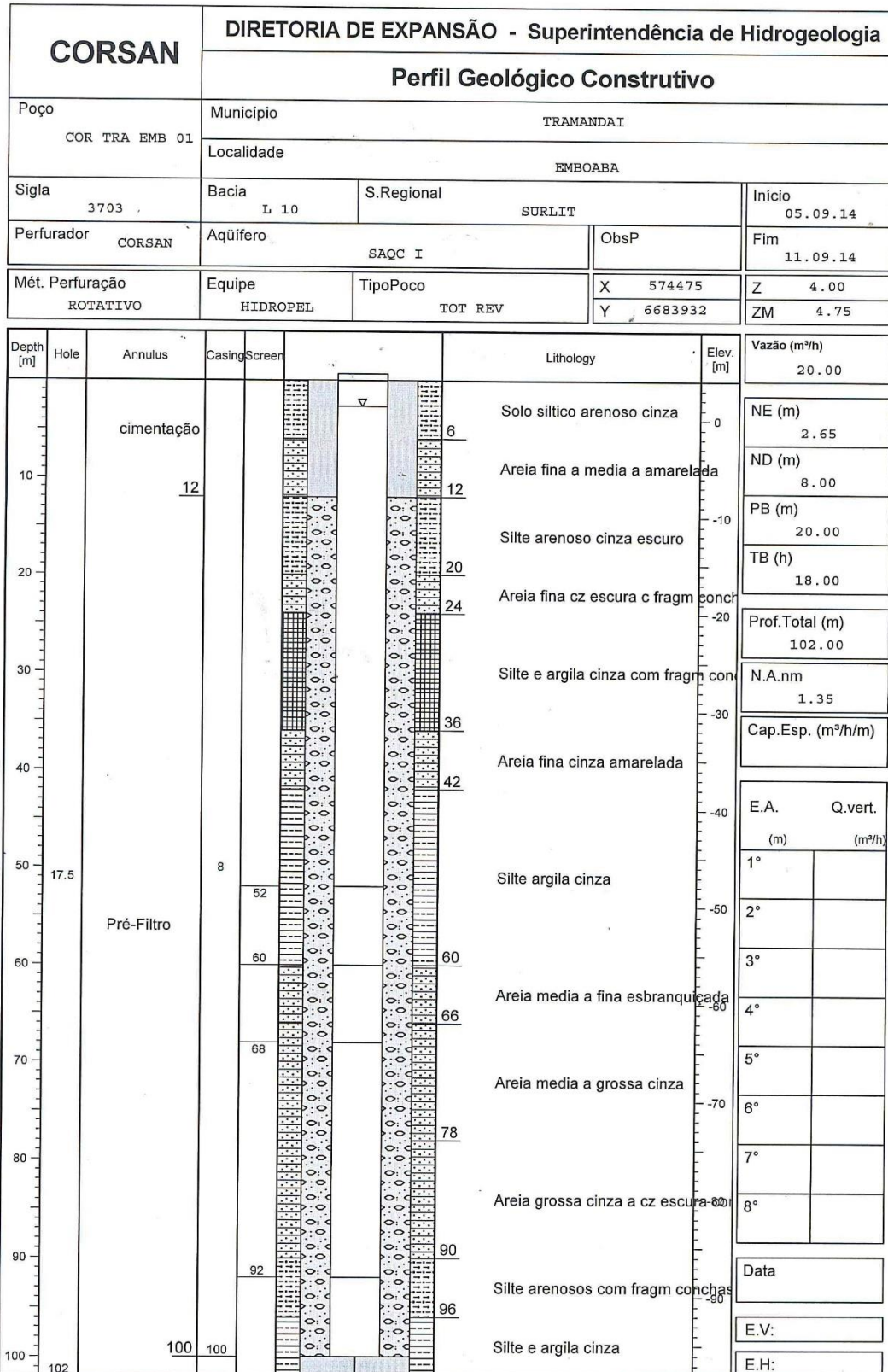
 Companhia Riograndense de Saneamento CORSAN Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente		POÇO Nº COR TRA ETA 02 Geral 3308	
MUNICÍPIO LOCALIDADE	TRAMANDAÍ ETA	Coordenadas UTM X 576263 Y 66830365 Z 11 m ZR 11.8 m	Coordenadas -50.21 -29.98 SH.22-X-C-V-3 Meridiano
Regional Bacia Código Perfurador Proprietário Aquífero	SURLIT Tramandaí L-10 CORSAN CORSAN Sist. Aquíf. Costeiro 1	TS - 25	Data (Inic.-Fim) 06/01/2007 22/01/2007
		CREA CORSAN nº 17865 ART Obra nº 3891229	

Mét. Perfuração	φ	Revest.	φ	Perfil Construtivo	EA (m³/h)	Mat. Anular	Litologia	Características	
Rotativo	30	Aço Calandrado	14			Selo Sanitário: Cimento			
							Material de Preenchimento	Areia	
		PVC Geomecânico	10					Argila	
								Areia	
Rotativo	20						Pré-Filtro: Areia	Areia Argilosa	fina
		Redução de 10 - 8	8					Argila	
								Areia Fina	
								Argila	
		Filtro	8					Areia Grossa	
								Argila Arenosa	fina
							Areia		
		PVC Geomecânico	8				Argila		
		PVC Geomecânico com Cimentação Interna	8			Selamento com Cimento e Material de Preenchimento	Areia e Argilas Intercaladas		
Rotativo	12.5								

Projeto Operacional	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	N.E.(m)	N.D.(m)	Prof.Bomba (m)	Tempo Máx.Bomb. (h)
	300	4800	13.46	35	50	16
Profundidade Total	111	m				
Profundidade Útil	98.4	m				
Cap. Específica	13.92	m³/h/m				
Restrições	Mn (0.15)					
			Situação Aguardando Serviço Serviço Montagem Eletro-mecânica	Data 19/03/2007	Márcio André Klein Responsável Técnico CREA 81585	


Fonte: CORSAN.

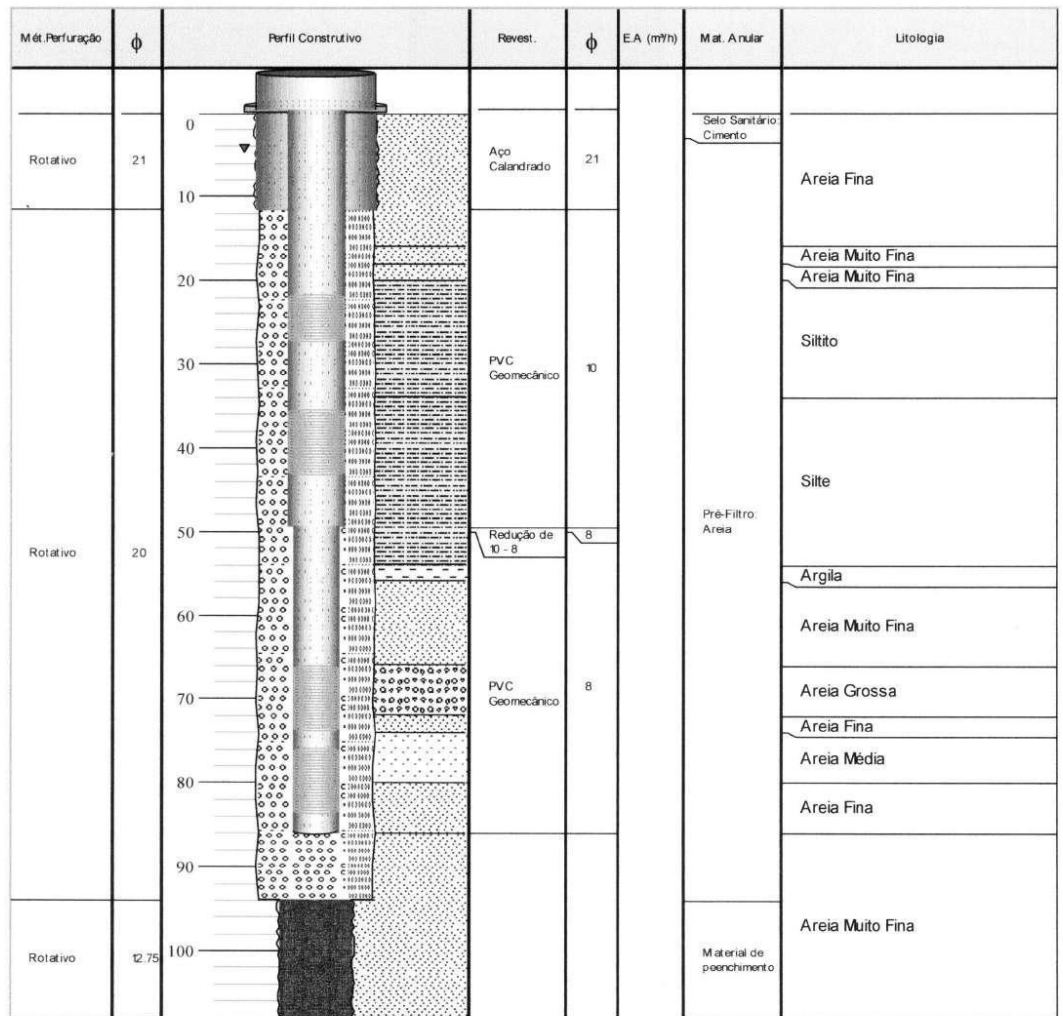
Anexo 4: Perfil construtivo do poço EMB 01.



Fonte: CORSAN.

Anexo 5: Perfil construtivo do poço ATL 02.

 Companhia Riograndense de Saneamento SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE		POÇO Nº COR OSO ATL 02 3112	
MUNICÍPIO LOCALIDADE	OSÓRIO ATLÂNTIDA SUL	Coordenadas UTM X 587941 Y 6695107 Z 5 m ZR 5.6 m	Coordenadas -50.0900000 -29.8700000 SH.22-X-C-V-3 Meridiano
Regional Bacia Código Perfurador Proprietário Aquífero	SURLIT Tramandaí L-10 CORSAN CORSAN Sist. Aquíf. Costeiro I	Data (Inic.-Fim) 12/01/2004 16/01/2004	CREA CORSAN nº 17865 ART Obra nº 2410143

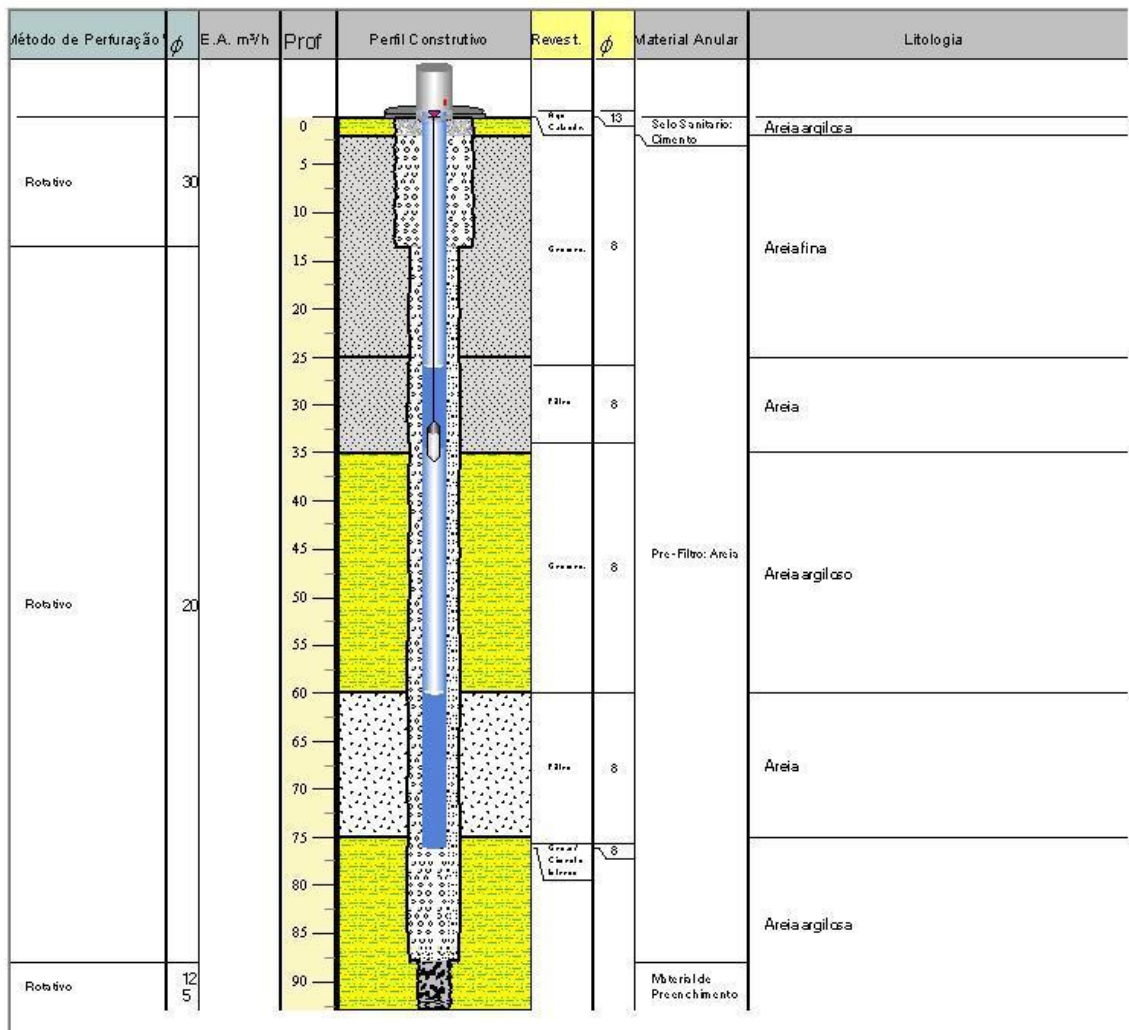


Projeto Operacional	Vazão (m ³ /h)		Vazão (m ³ /dia)		N.E.(m)	N.D.(m)	Prof.Bomba (m)	Tempo Máx.Bomb. (h)
		150		2700		3.82	30	45
Profundidade Total	108	m	Situação		Operação Contínua		Data 03/02/2004	
Profundidade Útil	86	m	Serviço				Ney Bortoloto Motta Responsável Técnico CREA 9574	
Cap. Específica	6.34	m ³ /h/m	Restrições		Cor(30), Turb.(13), Fe(2.1), Mn(0.697)			

Fonte: CORSAN.

Anexo 6: Perfil construtivo do poço ATL 04.

Companhia Riograndense de Saneamento Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente SURHMA		Código Poço COR OSO ATL 04 Número Geral 3512
Município OSÓRIO Localidade ATLÂNTIDA SUL	Coordenadas UTM 586865 6694941	Coordenadas Geográficas -50° 6' 1.9" -29° 52' 23.0"
Endereço ETA Regional SJRLIT Bacia Tramandaí L-10 Perfurador CORSAN Proprietário CORSAN Aquífero Sist. Aquif. Quaternário Costeiro I	Z 2 m Z + rev. 2.7 m Fuso 22 J Merid.Centr 51	Folha SH.22-X-C-V-4 Carta Tramandaí
	Início 14/01/2011 Fim 17/01/2011	CREA CORSAN N° 17865 ART Obra n° 5681866

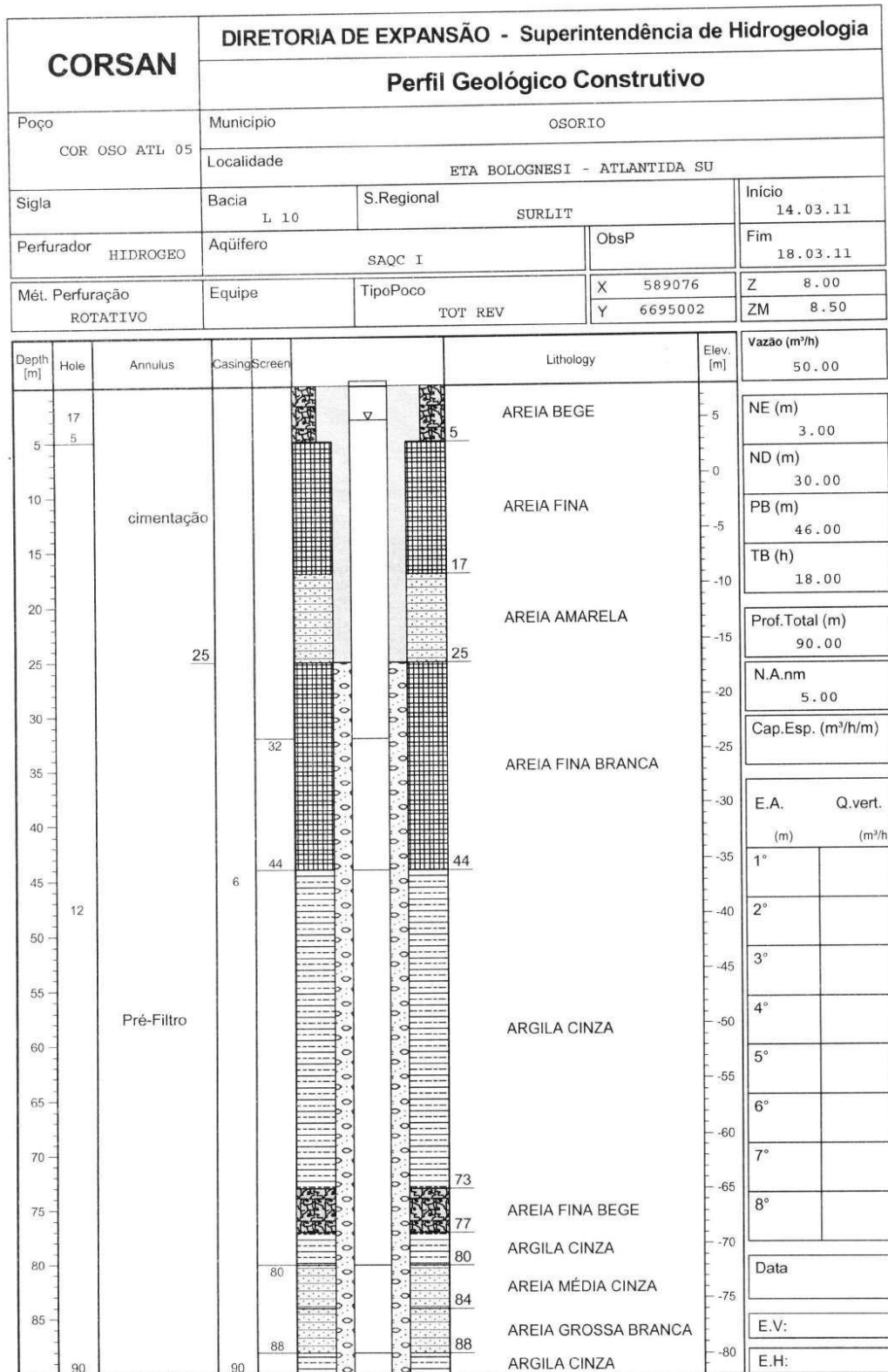


Dados Operacionais

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Prof. Bomba (m)	Tempo Máx. Bombeamento (h)
120	2160	0	13	36	18
Profundidade Total		93 m	Situação		10/02/2011
Profundidade Útil		75.7 m	Serviço		Montagem Eletro-mecânica
Capacidade Específica		9.23 m³/h/m	Licença		Mário André Klein
Restrição					81585

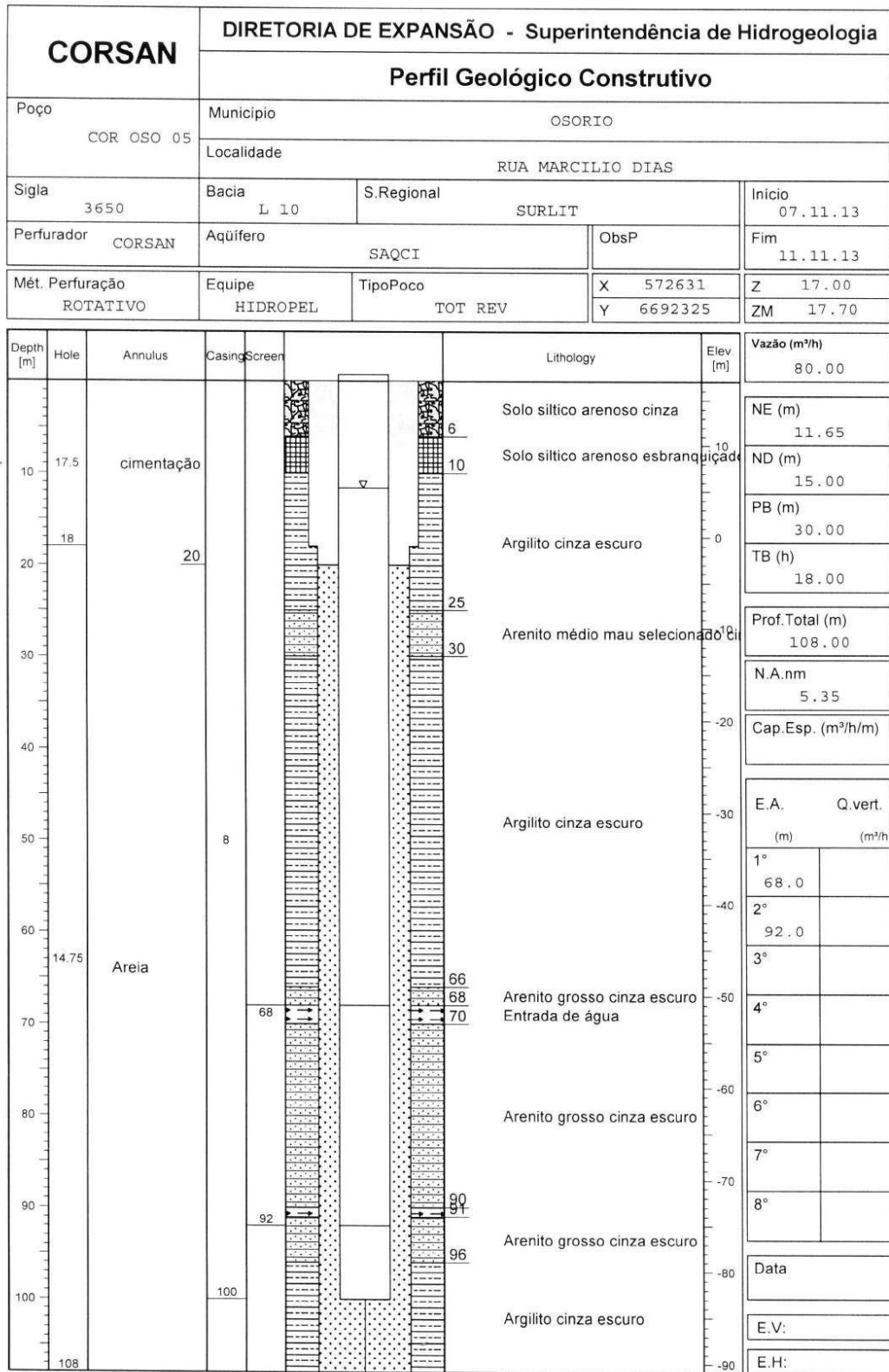
Fonte: CORSAN.

Anexo 7: Perfil construtivo do poço ATL 05.



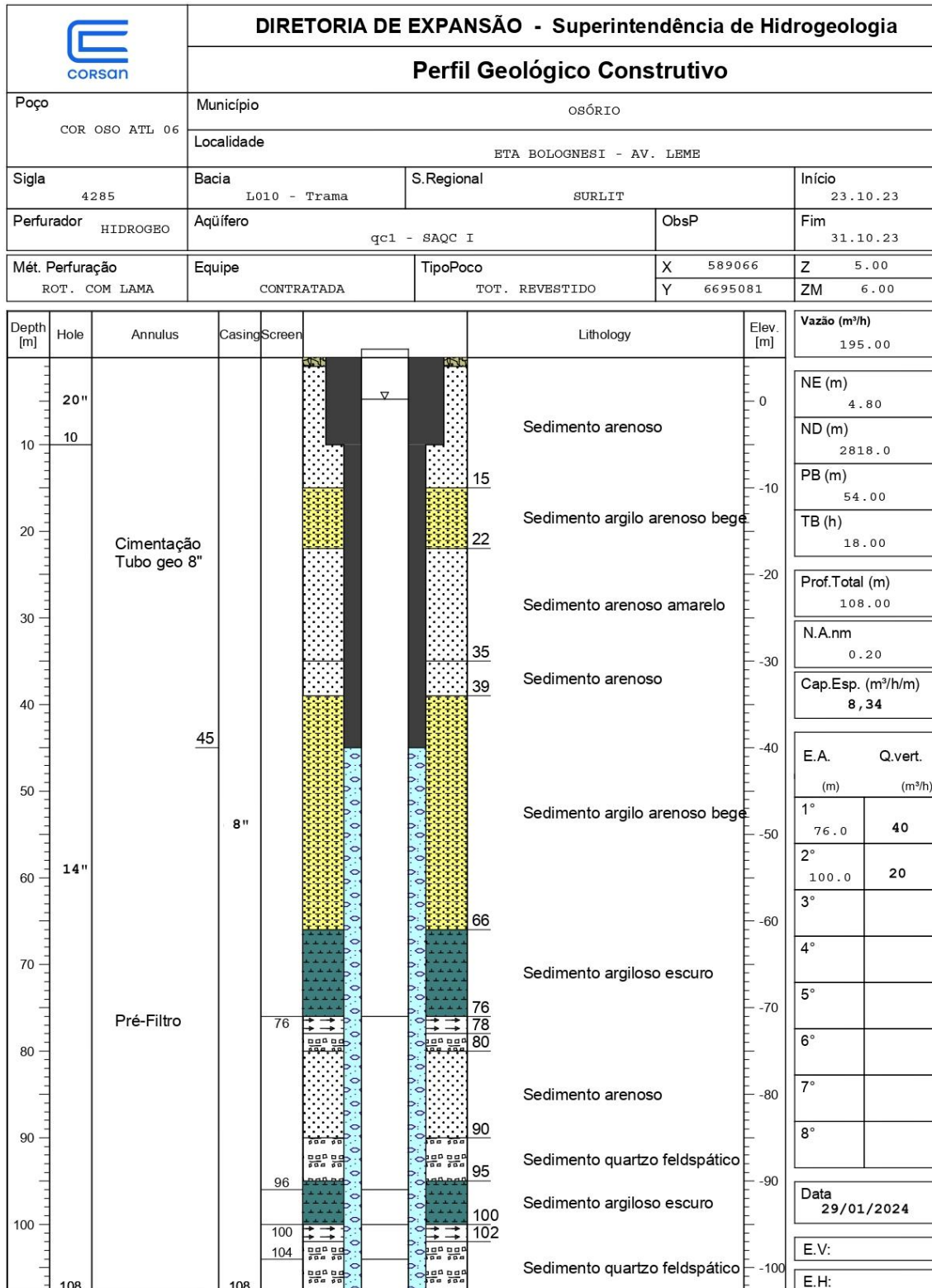
Fonte: CORSAN.

Anexo 8: Perfil construtivo do poço OSO 05.



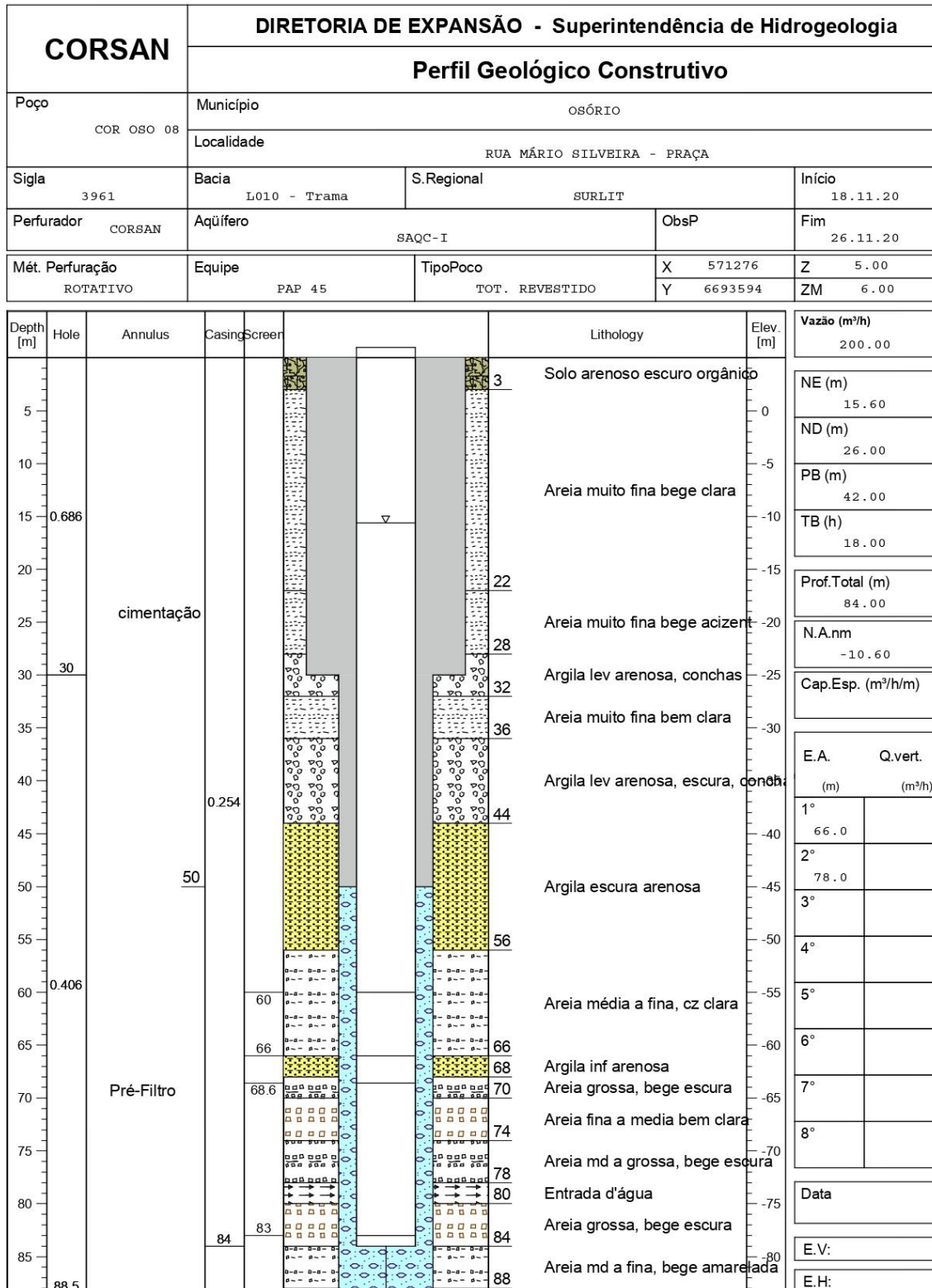
Fonte: CORSAN.

Anexo 9: Perfil construtivo do poço ATL 06.



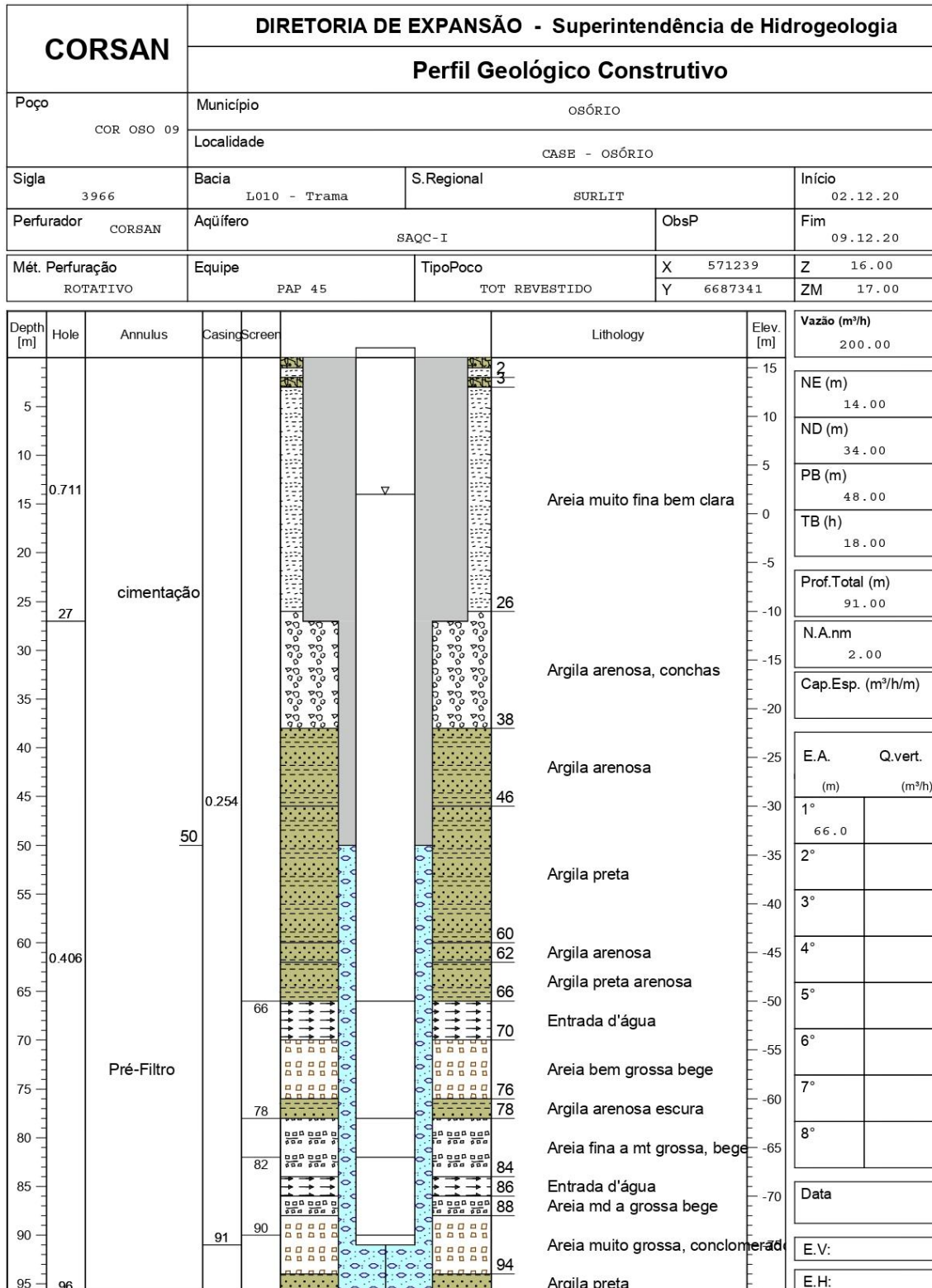
Fonte: CORSAN.

Anexo 10: Perfil construtivo do poço OSO 08.



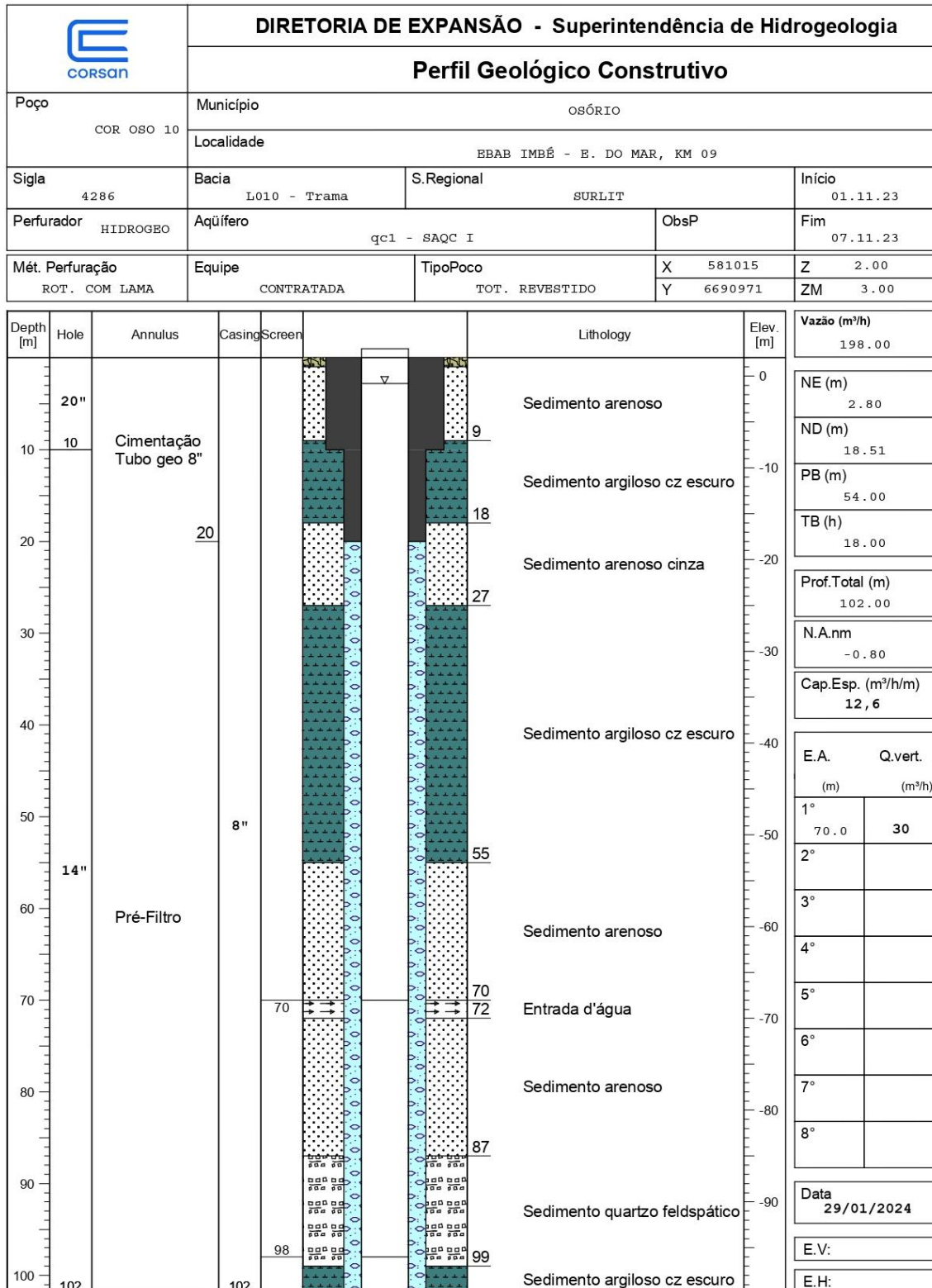
Fonte: CORSAN.

Anexo 11: Perfil construtivo do poço OSO 09.



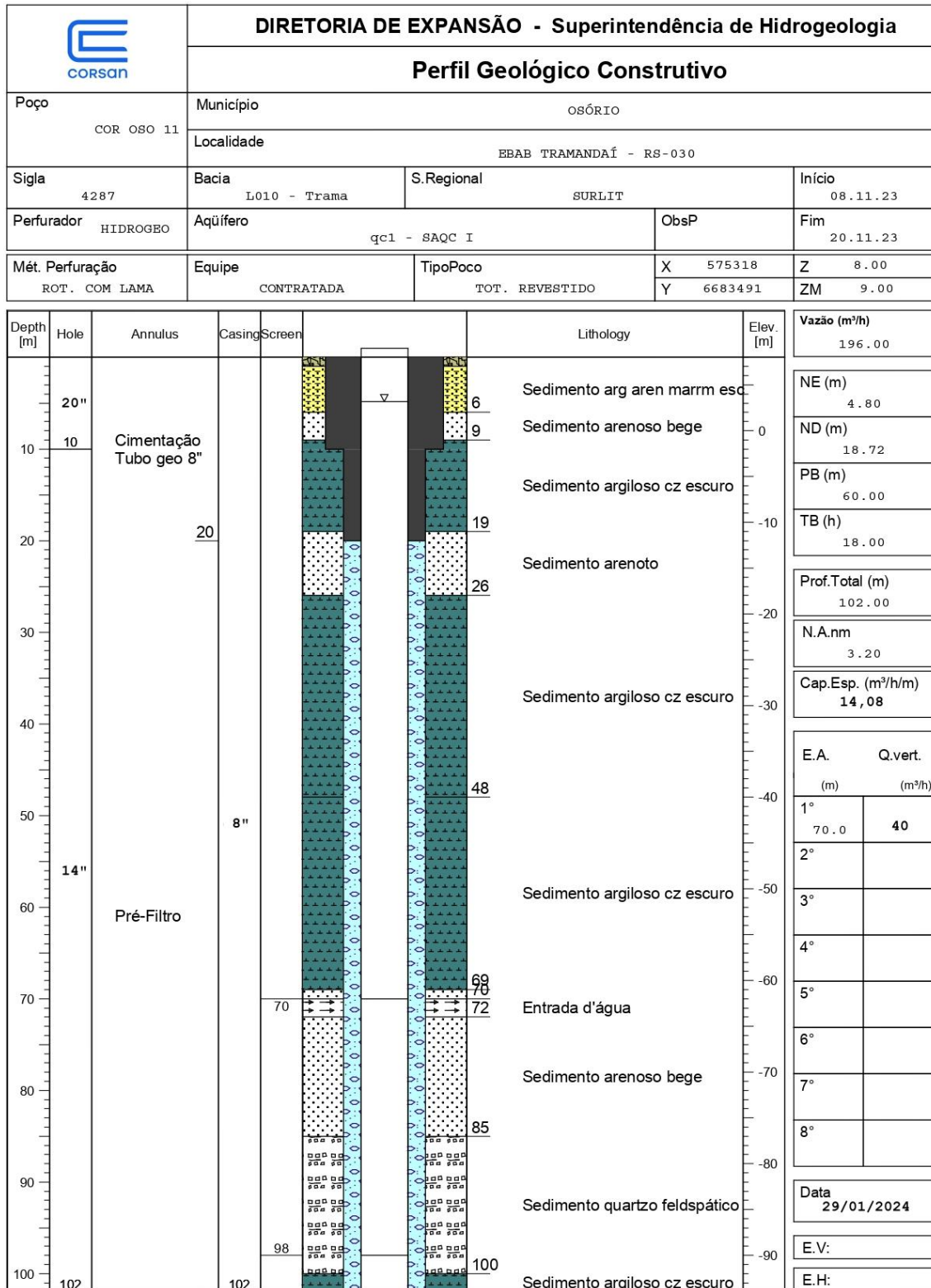
Fonte: CORSAN.

Anexo 12: Perfil construtivo do poço OSO 10.



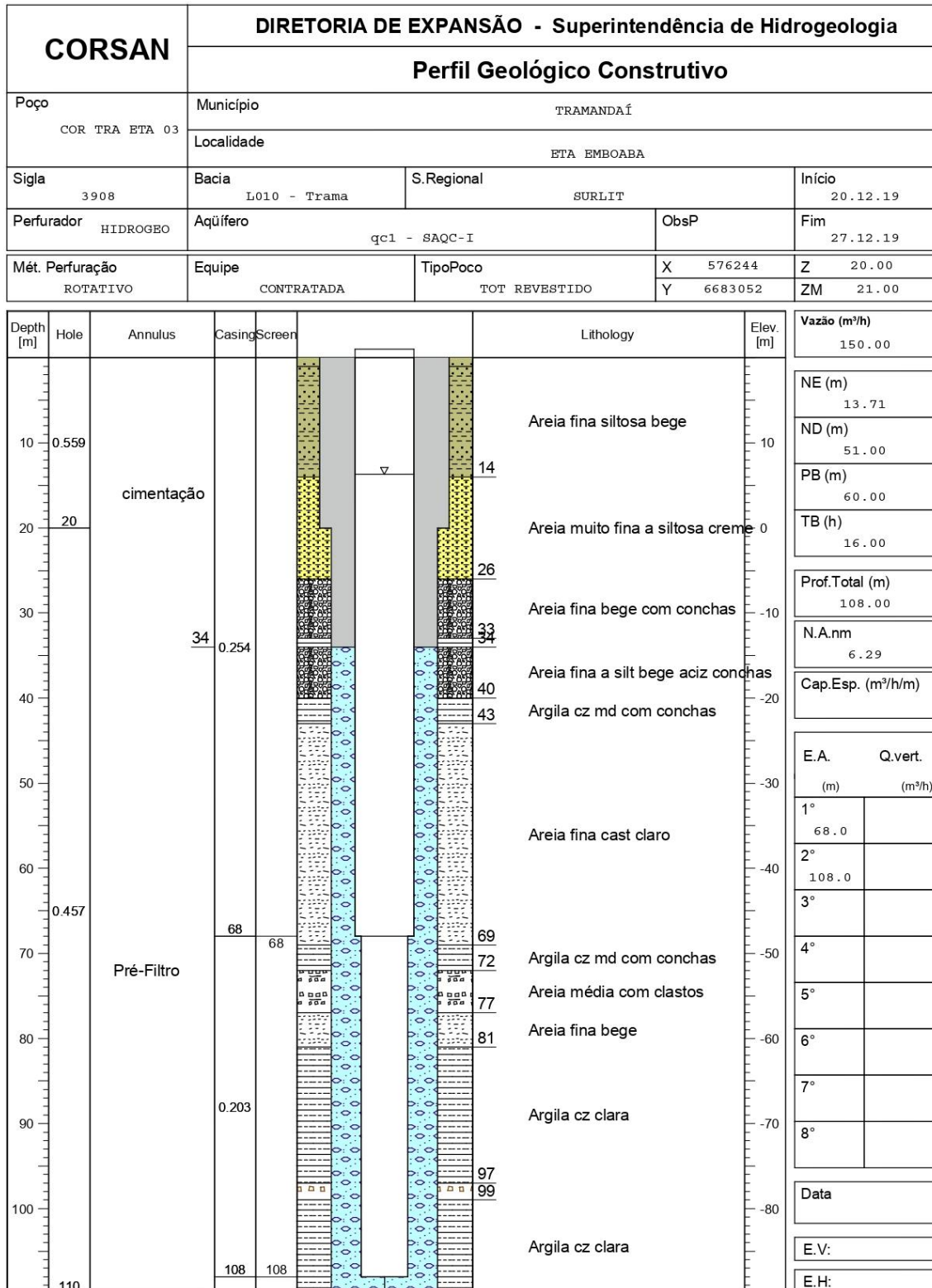
Fonte: CORSAN.

Anexo 13: Perfil construtivo do poço OS0 11.



Fonte: CORSAN.

Anexo 14: Perfil construtivo do poço ETA 03.



Fonte: CORSAN.

Anexo 15: Perfil construtivo do poço RMA 01.

Companhia Riograndense de Saneamento Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente SUPHMA		Código Poço <i>COR XAN RMA 01</i> Número Geral <i>1433</i>	
Município XANGRI-LÁ Localidade RAINHA DO MAR	Coordenadas UTM 589968 6697507	Coordenadas Geográficas -50° 04' 07.1" -29° 50' 57.3"	
Endereço Av. Paraguassu, S/Nº Regional Metropolitana Bacia Tramandaí L-10 Perfurador CORSAN Proprietário CORSAN Aquífero Sist. Aquíf. Costeiro I	Z 3 m Z + rev. 3 m Fuso 22 J Merid.Centr 51 Início 10/02/1988 Fim 09/03/1988	Folha SH.22-X-C-V-4 Carta Tramandaí CREA CORSAN Nº 17865 ART Obra nº	

Método de Perfuração	ϕ	E.A. m³/h	Prof	Perfil Construtivo	Revest.	ϕ	Material Anular	Litologia
Percussão	8		0		Aço Calandria	8	Selo Sanitário: Cimento	Areia fina, cinza, c/ matéria orgânica
			2					Areia fina, amarela, es feracidade de boa
			4					Areia fina, branca, es feracidade de boa
			6					Areia média, cinza es cura, es feracidade de boa
			8					Areia fina, cinza clara, c/ conchas, es feracidade de boa
Percussão	8		10	Geomec	7	Pre-Filtro: Areia	Areia fina, cinza, es feracidade de boa	
			12				Silte arenoso, mamom claro	
			14				Silte arenoso, cinza es verdeado	
			16				Silte arenoso, cinza amarelado	
			18				Silte arenoso, cinza es verdeado	
Percussão	10		20	Geomec	7	Selamento com	Areia fina, branca, es feracidade de boa	
			22					
			24					
			26					
			28					
			30					
			32					

Dados Operacionais

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Prof. Bomba (m)	Tempo Máx. Bombeamento (h)
46	828	1.72	12	24	18
Profundidade Total	32 m	Situação	Aguardando Serviço		04/04/2011 Francisco Eduardo de Tolla Goulart 59449
Profundidade Útil	0 m	Serviço	Análise F.Q.		
Capacidade Específica	m³/h/m	Licença	Regularização (Tamponamento)		
Restrição					

Fonte: CORSAN.

Anexo 16: Perfil construtivo do poço NTR 03B.

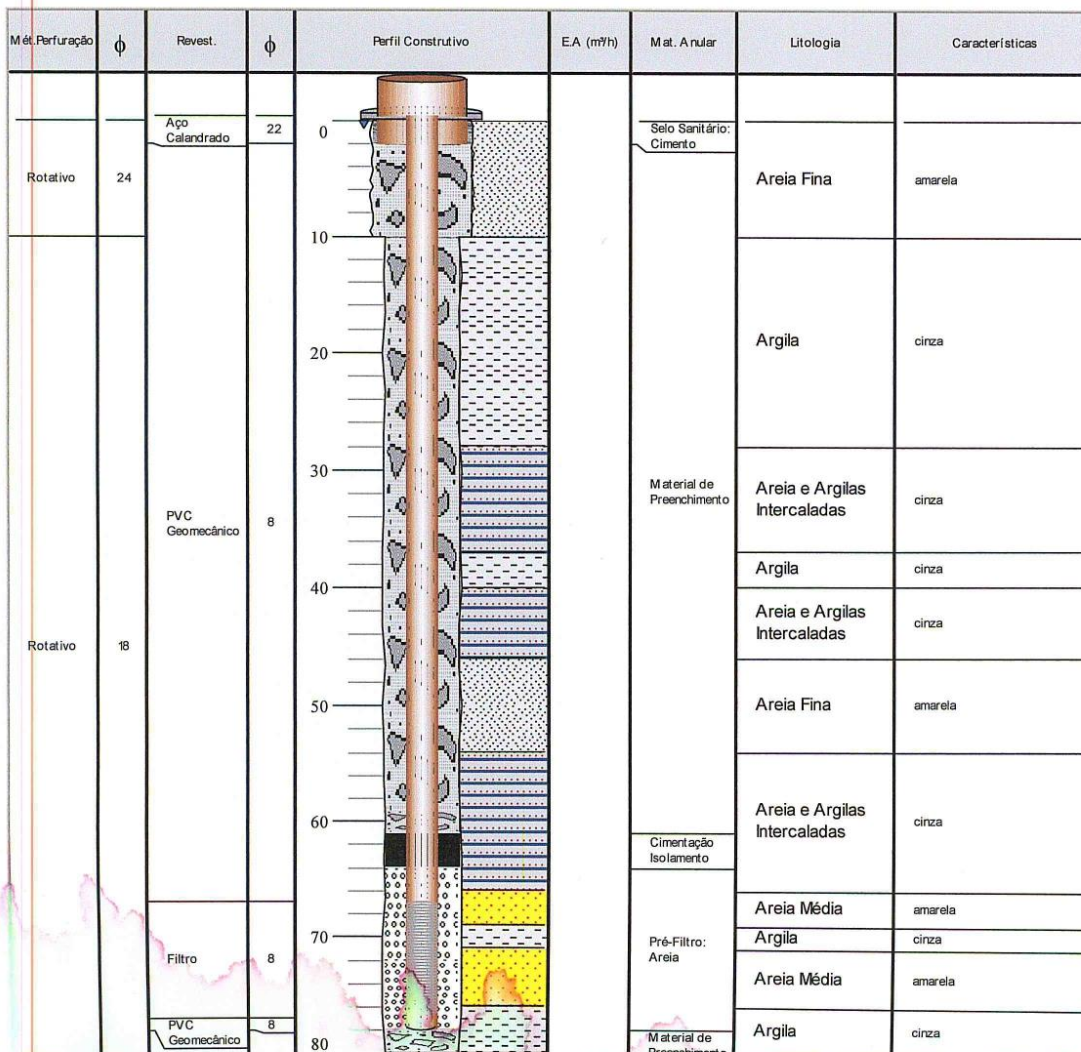
 **Companhia Riograndense de Saneamento**
 CORSAN Superintendência de Recursos Hídricos e meio Ambiente

POÇO Nº COR TRA NTR 03 B

Geral 3039

MUNICÍPIO	TRAMANDAÍ		
LOCALIDADE	NOVA TRAMANDAÍ		
Regional	<i>SURLIT</i>		
Bacia	<i>Tramandaí</i>		
Código	<i>L-10</i>		
Perfurador	CORSAN	TS - 25	
Proprietário	CORSAN		
Aquífero	<i>Sistema Aquíf. Costeiro I</i>		

Coordenadas UTM	Coordenadas
X 580177	-50.17
Y 6677225	-30.03
Z 5 m	SH.22-Z-A-II-2
ZR 5.43 m	Meridiano
Data (Inic.-Fim)	CREA CORSAN nº
18/10/2002	17865
21/10/2002	ART Obra nº
	01627917



Projeto Operacional	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	N.E.(m)	N.D.(m)	Prof.Bomba (m)	Tempo Máx.Bomb. (h)
	50	900	0	8.5	30	18
Profundidade Total	80	m	Situação Operação Temporária Serviço			
Profundidade Útil	77.3	m				
Cap. Específica	5.9	m³/h/m				
Restrições	COR(12), TURB.(1.5)					

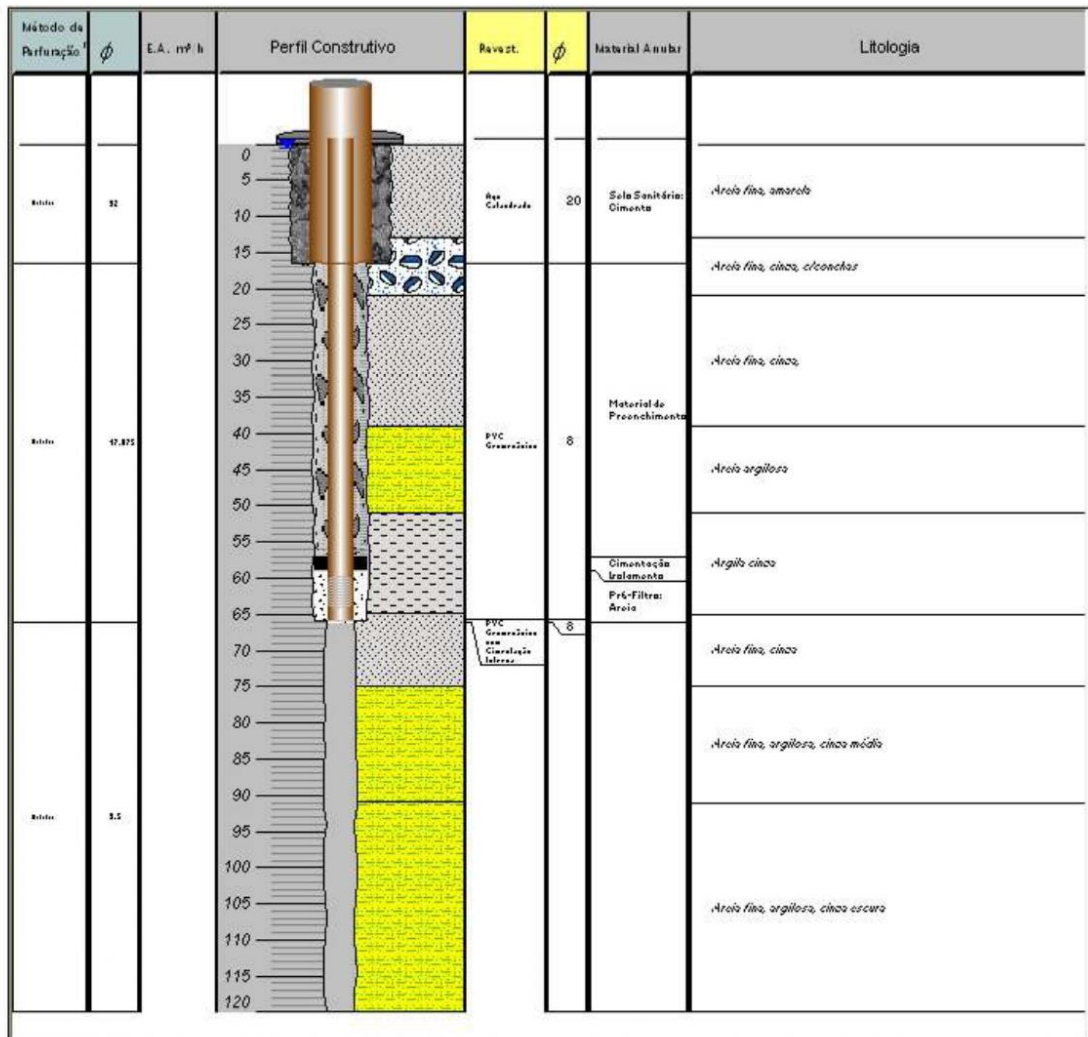
Data 23/12/2002

Jorge Luiz Fetter Furtado
 Responsável Técnico
 CREA 45909

Fonte: CORSAN.

Anexo 17: Perfil construtivo do poço NTR 06.

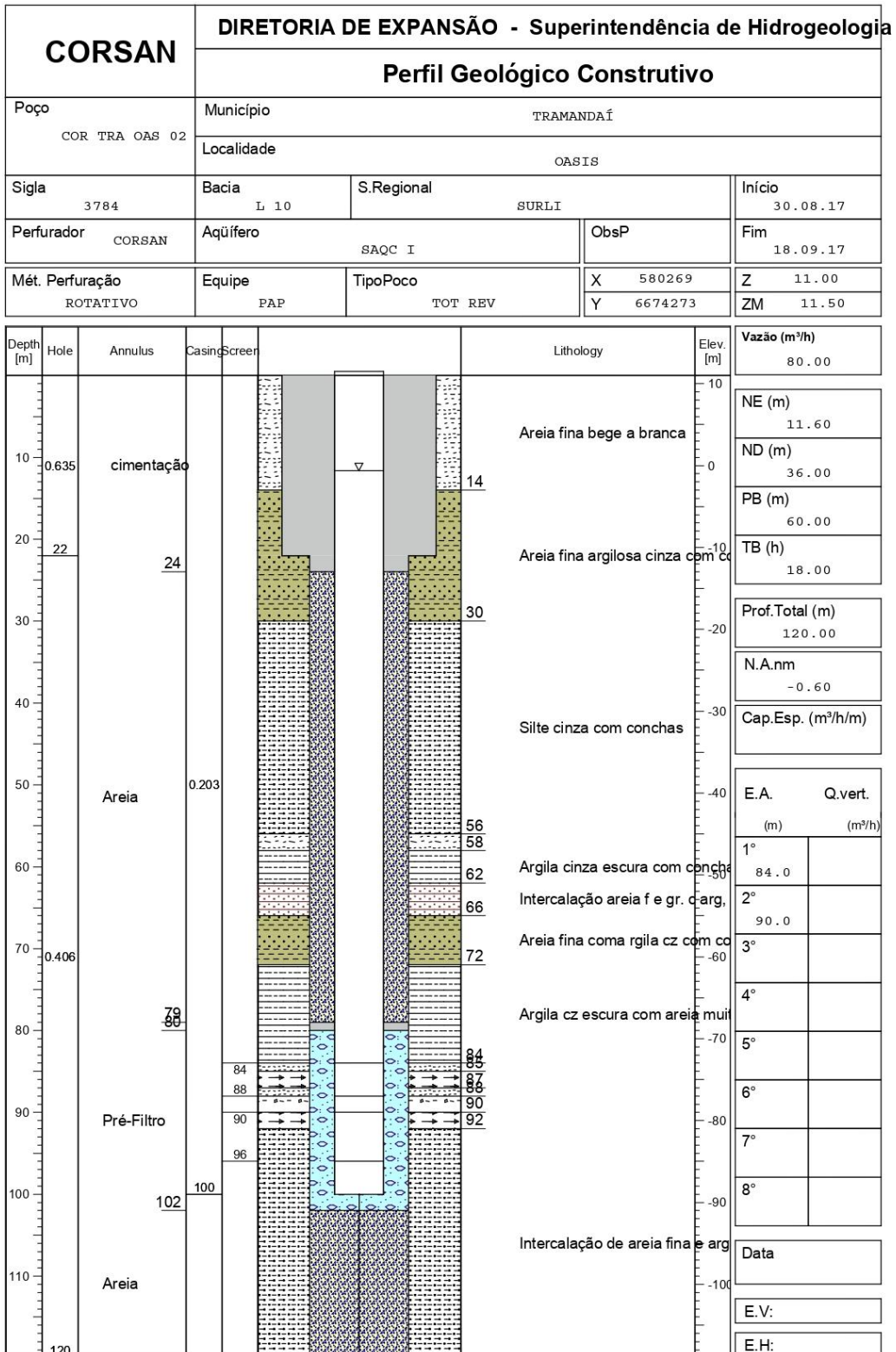
MUNICÍPIO	TRAMANDAÍ	Coordenadas UTM	Coordenadas Geograf.
LOCALIDADE	NOVA TRAMANDAÍ	X 579408	-50 10' 35"
Endereço	<i>Loteamento sem Urbanização</i>	Y 6675825	-30 02' 48"
Regional	<i>Metropolitana</i>	Z 5 m	Carta Tramandaí
Bacia	<i>Tramandaí</i>	ZR 5 m	Folha SH-22-ZA-II-2 e
Código	<i>L-10</i>	Merid.Central 51	CREA CORSAN n°
Perfurador	CORSAN	Fuso 22 J	17865
Proprietário	CORSAN	Data (Inic.-Fim)	ART Obra n°
Aquífero	<i>Sist. Aquíf. Costeiro I</i>	12/07/2002	4414364
	TS - 25	19/07/2002	



Projeto Operacional	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	N.E. (m)	N.D. (m)	Prof. Bomba (m)	Tempo Máx. Bomb. (h)
	4	56	0.46	58	60	14
Profundidade Total	120 m					
Profundidade Útil	66 m		Situação Tamponado	Data 25/08/2002		
Cap. Específica	0.121 m³/h/m		Serviço Retirar Revest/Selar			
Restrições	VAZA O, CLORETOS,					
					Hey Bortoloto Motta Responsável Técnico CREA 9574	

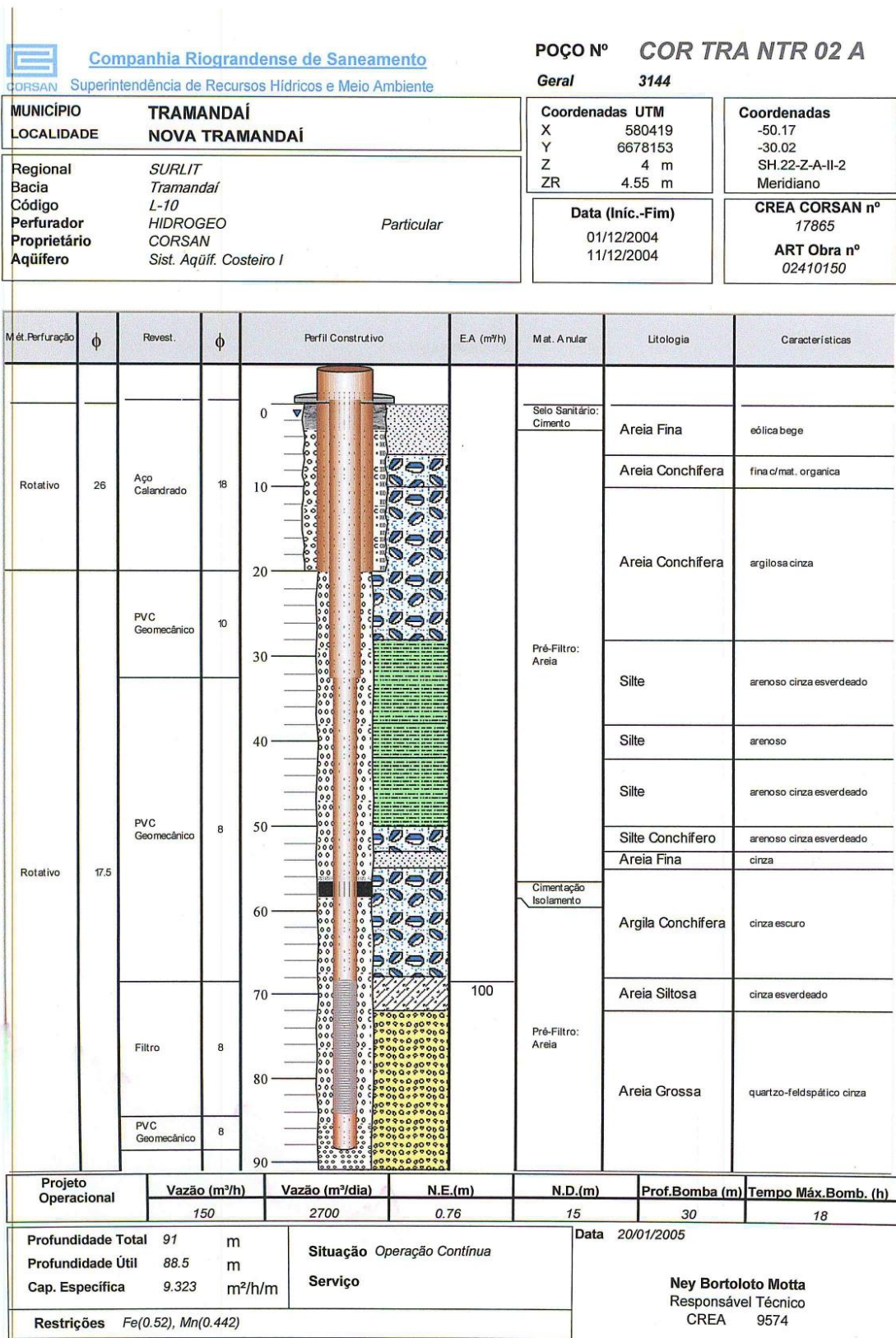
Fonte: CORSAN.

Anexo 18: Perfil construtivo do poço OAS 02.



Fonte: CORSAN.

Anexo 19: Perfil construtivo do poço COR NTR 02A.



Fonte: CORSAN.

Anexo 20: Amostras de calha do poço EMB 02.



Fonte: CORSAN.

Anexo 21: Amostras de calha do poço OSO 01A.



Fonte: CORSAN.

Anexo 22: Amostras de calha do poço OSO 06.



Fonte: CORSAN.