

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

LUCCA MAIA ROSA

AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, QUALIDADE E CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS  
NAS ÁGUAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS COSTEIRO E GUARANI NO MUNICÍ-  
PIO DE TERRA DE AREIA (RS)

Porto Alegre

2023

LUCCA MAIA ROSA

AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, QUALIDADE E CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS  
NAS ÁGUAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS COSTEIRO E GUARANI NO MUNICÍ-  
PIO DE TERRA DE AREIA (RS)

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Regi-  
nato

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Luiza Correa da Câ-  
mara Rosa

Supervisor: Geólogo Maiquel Kochhann Lunkes

PORTO ALEGRE  
2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Maia Rosa, Lucca

AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, QUALIDADE E CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS NAS ÁGUAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS COSTEIRO E GUARANI NO MUNICÍPIO DE TERRA DE AREIA (RS) / Lucca Maia Rosa. -- 2023.

93 f.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Coorientadora: Maria Luiza Correa da Camara Rosa.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Hidrogeologia. 2. Hidroquímica. 3. Sistema Aquífero Guarani. 4. Sistema Aquífero Costeiro. 5. Cloretos. I. Roehe Reginato, Pedro Antonio, orient. II. Correa da Camara Rosa, Maria Luiza, coorient. III. Título.

Lucca Maia Rosa

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**Avaliação da composição, qualidade e concentração de cloretos nas águas dos Sistemas Aquíferos Costeiro e Guarani no município de Terra de Areia (RS)**”, elaborado por Lucca Maia Rosa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Porto Alegre, 17 de março de 2023.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lauren da Cunha Duarte  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Tiago Vargas (UFRGS)

---

Prof. Dr. Alfonso Risso (UFRGS)

---

Prof. Dr. Antonio Pedro Viero (UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente dedico este trabalho a todos aqueles que me acompanharam ao longo dessa trajetória, por todo apoio e parceria que recebi.

Agradeço aos meus familiares, meus pais, Carolina e Marcos, meus avós, Maria da Graça e Sérgio, Nadir e Adão (*in memoriam*), a quem devo pela pessoa que sou.

A minha parceira, meu amor, Cássia por seu companheirismo durante essa jornada e seu apoio, em todos os momentos.

Das amizades que conquistei ao longo do curso, em especial ao grupo gbbs, pois sem vocês o curso não seria o mesmo.

Aos Professores Pedro Reginato e Maria Luiza, por toda atenção, paciência e orientação durante o final do curso, contribuindo imensamente para minha formação.

Aos meus supervisores Ricardo e Camila, por todos ensinamentos e incentivos durante o período de estágio.

Ao meu supervisor Maiquel pelo suporte durante o trabalho e à CORSAN pela disponibilização dos dados e equipamentos.

À funcionária Franciele Lopes, da Vigilância Sanitária da Prefeitura de Terra de Areia, e ao funcionário Marcelo Saraiva, da UFRGS, pelo auxílio prestado durante o trabalho de campo.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por tornar possível a minha formação, através de uma universidade pública de excelência.

## RESUMO

O município de Terra de Areia é estritamente abastecido através de águas subterrâneas, grande parte pela CORSAN através de poços tubulares, mas também por poços comunitários, assim como poços individuais do tipo ponteira, muito comuns na região costeira. A partir desse estudo foi possível avaliar a hidroquímica, a qualidade e a concentração de cloretos da água subterrânea existente na região. O estudo foi realizado tendo como base dados hidrogeológicos e hidroquímicos fornecidos pela CORSAN e SGB-CPRM e obtidos com o desenvolvimento de trabalhos de campo e análises físico-químicas realizadas em campo e laboratórios. Os aquíferos identificados para o município estão relacionados ao Sistema Aquífero Guarani (SAG), Sistema Aquífero Costeiro (SAC) e Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), de modo que o estudo foi realizado para os dois primeiros sistemas. O SAG na região é um aquífero confinado representado pela Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, captado por poços que apresentam em média 200 m de profundidade, com um nível estático médio de 24,5 m e uma vazão média de 14 m<sup>3</sup>/h. As águas do SAG foram caracterizadas como bicarbonatadas sódicas, com uma CE média de 300 µS/cm, um pH integralmente básico com média próxima de 8, de modo que apresentaram águas de boa qualidade em relação à potabilidade. O SAG também apresenta misturas de águas, associadas ao SAC, de composição cloretada sódica, com anomalias para alguns parâmetros físico-químicos, com destaque para os cloretos. Estas águas apresentaram baixa qualidade para o consumo humano já que alguns destes parâmetros encontram-se acima dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) estabelecidos pela legislação, incluindo os cloretos. O SAC é captado por poços que apresentam em média 20 m de profundidade, limitando-se aos sedimentos inconsolidados cenozóicos. As águas do SAC foram classificadas como cloretadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas, com valores de CE com média de 240 µS/cm, e máximo de 2825 µS/cm, além de um pH ácido com média de 5,43. A qualidade da água é variável, pois quando captada em sedimentos do SAC associados à Barreira III, tendem apresentar melhor qualidade, o oposto do observado em águas captadas em sedimentos lagunares, onde as águas apresentam baixa qualidade quanto aos VMPs, associada à presença de cloretos, ferro e manganês. A presença de cloretos nos aquíferos captados da região está associada a gênese dos sedimentos lagunares. Os poços que captam águas do SAG e apresentam influência do SAC, portanto, também demonstram estas anomalias principalmente associadas aos cloretos. Sugere-se estudos mais aprofundados quanto à distribuição e compartimentação do SAC na área de estudo, além de uma investigação associada às interações hidroquímicas e hidrodinâmicas entre os aquíferos da região.

Palavras-Chave: Planície Costeira; Hidrogeologia; Hidroquímica; Sistema Aquífero Guarani; Sistema Aquífero Costeiro; Cloretos

## ABSTRACT

The city of Terra de Areia is strictly attended by groundwaters, mostly by CORSAN through wells, but also by community wells, as well as individual driven wells, very common in the coastal area. From this study it was possible to characterize the geology, the hydrogeology, the hydrochemistry and the quality of the water from this region, from academic and field obtained data. The aquifers identified around the city are related to the Guarani Aquifer System (GAS), Coastal Aquifer System (CAS) and more subordinate, the Serra Geral Aquifer System (SGAS). The GAS, represented by the Botucatu Hydrostratigraphic Unity, is captured by wells that have an average depth of 200 meters, with a static level average of 24,5 m and an average flow of 14 m<sup>3</sup>/h. The GAS groundwaters were characterized as sodium bicarbonate, with an average electric conductivity (EC) of 300  $\mu$ S/cm, and a pH fully basic with an average close to 8, so that they presented good quality water in relation to potability. The GAS also presents mixed waters, associated to CAS, with sodium chlorinated waters, with some physical-chemical parameters presenting anomalies, with emphasis on the chlorides. These waters presented low quality for human consumption, since some of these parameters are above the maximum allowed values (MAVs) established by legislation, including the chlorides. The CAS is mostly represented by the Hydrostratigraphic Unity 1, with wells that presents on average 20 m depth. The SAC waters were classified as calcium chlorinated and calcium bicarbonate, with EC values with an average of 240  $\mu$ S/cm and maximum value of 2825  $\mu$ S/cm, with an acidic pH with an average of 5,43. The quality of the water is variable, because when captured in lagoon SAC sediments associated to the Barrier III, tend to present better quality, the opposite observed in waters captured in lagoon sediments, where the waters show low water quality when compared to the MAVs, associated to chlorides, iron and manganese presence. The chlorides presence in the captured aquifers in the region is associated by the genesis of the Cenozoic lagoon sediments. The GAS wells that have CAS influence, therefore, also demonstrate anomalies mainly associated to the chlorides. Further studies are suggested regarding the distribution and compartmentalization of the CAS in the study area, in addition to an investigation associated with the hydrochemical and hydrodynamic interactions between the aquifers in the region.

Palavras-Chave: Coastal Plain; Hydrogeology; Hydrochemistry; Guarani Aquifer System; Coastal Aquifer System; Chlorides

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da localização da área de estudo, município de Terra de Areia, RS. Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2020). .....	18
Figura 2. Mapa da Bacia do Paraná com sua localização ao longo do continente sul-americano.....	20
Figura 3. Mapa geológico da planície costeira, representando as barreiras holocênica (IV) e pleistocênicas (I, II e III), como também os sistemas de leques aluviais (Modificado de DILLENBURG & BARBOZA, 2014; BARBOZA et al., 2021). .....	24
Figura 4. Mapa da geologia regional para área de estudo, elaboração própria a partir de dados da CPRM (2008) e IBGE (2020).....	26
Figura 5. Mapa hidrogeológico da área de estudo, elaboração própria a partir de dados da CPRM (2005) e IBGE (2020).....	27
Figura 6. Bloco diagrama adaptado de Troian et al. (2020), o qual representa o modelo conceitual para região norte da área de estudo e demonstra as unidades hidroestratigráficas observadas.....	30
Figura 7. Diagrama Stiff representando as diferentes classes de águas a partir de amostras de água subterrânea do SAG (REGINATO et al., 2013).....	33
Figura 8. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas da região do litoral norte (adaptado de Troian et al, 2014).....	35
Figura 9. Gráfico USSL indicando o risco à salinização e ao sódio para irrigação (adaptado de Reginato et al., 2009). .....	36
Figura 10. Gráfico com a razão molar entre Cl/Br versus a concentração de cloretos para seis tipos de salinidade em aquíferos da Espanha e Portugal (modificado de Alcalá & Custódio, 2004; Tradução de Sanches, 2016). .....	38
Figura 11. Imageamento do poço COR TAR 12 com o uso da câmera LAVAL R-CAM 1000. ....	40
Figura 12. Análise de água utilizando a sonda multiparâmetros modelo KkCare. ....	41
Figura 13. Perfuração realizada em sedimentos inconsolidados de paleobarreira com auxílio de trado manual. ....	43
Figura 14. Mapa geológico do município elaborado a partir de dados da CPRM (2008) e dados obtidos em campo. ....	46
Figura 15. Derrames de lava basáltica em área de empréstimo, detalhe para os derrames individualizados em vermelho. ....	47



Figura 16. Zona de vesículas e amígdalas em basalto acinzentado, correspondendo a provável porção central do derrame, além de pequenos veios também presentes no poço TAR-12.....	48
Figura 17. Zona onde predominam fraturas e veios, além de pequenas vesículas à esquerda, também no poço TAR-12.....	48
Figura 18. Zona de contato no poço TAR-12 entre o basalto e o arenito, à esquerda detalhe para as amígdalas onde há transição para o arenito, até a entrada d'água observada à direita onde ocorre o contato, ocorrendo precipitação de prováveis carbonatos.....	49
Figura 19. Detalhe para interface basalto-arenito, do poço TAR-12, onde o arenito intertrápico (porção superior) transiciona para o basalto amígdaloide com entrada d'água presente. ....	50
Figura 20. Detalhe para interface basalto-arenito, do poço TAR-12, onde o arenito intertrápico (porção superior) transiciona para o basalto, sendo aqui sua porção basal.....	50
Figura 21. Perfil geológico esquemático elaborado pela CORSAN do poço TAR-06 com a presença de arenitos intertrapps. ....	51
Figura 22. Perfil geológico esquemático elaborado pela CORSAN do poço TAR-05 também com a ocorrência de arenitos intertrapps. ....	52
Figura 23. À esquerda trincheira escavada em paleoduna onde é possível observar o nível de solo amarronzado, gradando para areias de coloração amarelo-alaranjada e posteriormente de coloração branca-creme onde também foi coletada pela extração a trado à direita. ....	53
Figura 24. Perfil geológico/construtivo do poço TAR 11 onde evidencia a transição dos dois depósitos provavelmente de origens distintas. ....	54
Figura 25. Escavação por meio de trado manual em depressão topográfica, correspondente aos depósitos de turfeira. ....	56
Figura 26. Abertura de trincheira de 30x48 cm onde é possível observar o nível freático em sua base. ....	56
Figura 27. Mapa hidrogeológico elaborado a partir de dados da CPRM (2006) com dados levantados pelo autor.....	57
Figura 28. Seção norte-sul A-A' elaborada a partir do software Strater 5 representativa dos perfis geológicos dos poços tubulares, com as três unidades geológicas presentes. ....	59
Figura 29. Poços ponteira TRP-05, TRP-06 e TRP-17 respectivamente, como diferentes formas de captação. ....	61

Figura 30. Seção B-B' elaborada a partir do software Strater 5 com detalhe maior para o SAC, onde é possível observar a relação das camadas entre os poços, com a base da porção arenosa em correlação. ....	62
Figura 31. Seção C-C' elaborada através do software Strater 5 onde é possível observar a transição das camadas arenosas para as camadas argilosas e areno-argilosas do poço JP817 RIMAS.....	63
Figura 32. Diagrama Piper para o SAG na área de estudo, com os pontos circulares representando os poços TAR de acordo com os principais ânions e cátions presentes nas águas. ....	66
Figura 33. Diagramas Stiff para os diferentes poços que captam águas do SAG. Ânions e cátions medidos em meq/L.....	68
Figura 34. Diagrama USSL para os poços TAR com risco à salinização e de sódio.....	69
Figura 35. Diagrama Piper para o SAG com influência do SAC na área de estudo, com os pontos circulares representando os poços TAR de acordo com os principais ânions e cátions presentes nas águas. ....	71
Figura 36. Diagramas Stiff para os poços que captam águas do SAG com influência do SAC, ânions e cátions medidos em meq/L.....	72
Figura 37. Diagrama USSL para os poços TAR com o risco à salinização e de sódio, para os poços do SAG com influência do SAC.....	72
Figura 38. Diagrama Piper para os poços que captam águas do SAC, com duas classes distintas, simbolizados pelos pontos circulares. ....	76
Figura 39. Diagramas Stiff para os poços que captam águas do SAC. Ânions e cátions medidos em meq/L.....	77
Figura 40. Mapa geológico elaborado a partir de dados da CPRM (2008) e dados do autor, para os poços com anomalias de cloretos .....	79
Figura 41. Perfil geológico para o poço TAR-12 elaborado pela CORSAN com destaque para camada do SAC onde ocorrem argilas arenosas próximas à entrada d'água entre 30 e 34 m. ....	81
Figura 42. Perfil construtivo geológico para o poço JP817 obtido a partir do SIAGAS.....	82
Figura 43. Gráfico com a razão molar entre Cl/Br versus a concentração de cloretos para seis tipos de salinidade em aquíferos da Espanha e Portugal, com os poços JP817 (ponto azul) e JP818 (ponto verde) (modificado de Alcalá & Custódio, 2004; Tradução de Sanches, 2016). ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplo de planilha utilizada no projeto para dados iniciais.....	42
Tabela 2. Dados estatísticos para a vazão no Sistema Aquífero Guarani.....	58
Tabela 3. Dados estatísticos para a capacidade específica no SAG. ....	58
Tabela 4. Dados estatísticos para a profundidade no SAG.....	58
Tabela 5. Dados estatísticos para o nível estático no SAG.....	59
Tabela 6. Profundidade para os poços ponteira e de pequeno diâmetro para o SAC.....	60
Tabela 7. Dados estatísticos para condutividade elétrica dos poços no SAG...	64
Tabela 8. Dados obtidos a partir do equipamento SONLIST para o poço TAR-13. ....	64
Tabela 9. Tabela adaptada de Fetter (1994) onde mostra a classificação das águas subterrâneas a partir dos STD.....	64
Tabela 10. Dados estatísticos para os sólidos totais dissolvidos dos poços no SAG.....	65
Tabela 11. Dados estatísticos para o pH dos poços no SAG. ....	65
Tabela 12. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas para o Diagrama Piper para o SAG.....	66
Tabela 13. Análise da qualidade das águas do SAG na região em relação aos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita.....	70
Tabela 14. Parâmetros físico-químicos analisados estatisticamente para anomalia presente no SAG. ....	70
Tabela 15. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas do Diagrama Piper para o SAG com influência do SAC.....	71
Tabela 16. Análise da qualidade das águas do SAG na região com misturas de águas a partir de parâmetros do banco de dados. As células em vermelho representam as substâncias que se encontram acima dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita. ....	73
Tabela 17. Dados estatísticos para a condutividade elétrica dos poços no SAC. ....	74
Tabela 18. Dados estatísticos para os sólidos totais dissolvidos dos poços no SAC.....	74
Tabela 19. Dados estatísticos para o pH dos poços no SAC.....	75

Tabela 20. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas para o Diagrama Piper para o SAC.....	76
Tabela 21. Análise da qualidade das águas do SAC na região, a partir de parâmetros obtidos em campo. As células em vermelho representam as substâncias que se encontram acima dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita.....	77
Tabela 22. Dados estatísticos para os cloretos nos poços que captam ambos os aquíferos, assim como os poços do SAG com influência do SAC. ....	78
Tabela 23. Dados obtidos a partir do equipamento SONLIST para o poço TAR-12. ....	80
Tabela 24. Principais parâmetros físico-químicos analisados estatisticamente presentes no poço JP817, com anomalias em grande parte das análises.....	83
Tabela 25. Razões iônicas para os poços TAR com anomalias de cloretos. ....	83
Tabela 26. Razões iônicas para os poços JP817 e JP818 do SAC. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CE – Condutividade elétrica

CECO – Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

FSG – Formação Serra Geral

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

NE – Nível estático

PCRS – Planície Costeira do Rio Grande do Sul

RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas

SAG – Sistema Aquífero Guarani

SAC – Sistema Aquífero Costeiro

SAQC – Sistema Aquífero Quaternário Costeiro

SASG – Sistema Aquífero Serra Geral

SEHABS – Secretaria de Habitação e Saneamento

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SIEGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIOUT RS – Sistema de Outorga de Água do Rio Grande do Sul

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

VMP – Valor Máximo Permitido

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	Localização .....	17
1.2	Caracterização do Problema .....	18
1.3	Objetivos .....	19
2	ESTADO DA ARTE .....	19
2.1	Contexto geológico.....	19
2.1.1	Bacia do Paraná .....	21
2.1.2	Planície Costeira.....	23
2.2	Contexto Hidrogeológico .....	26
2.2.1	Sistema Aquífero Guarani .....	27
2.2.2	Sistema Aquífero Costeiro .....	29
2.3	Contexto Hidroquímico e da Qualidade da Água Subterrânea ..	31
2.3.1	Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani .....	32
2.3.2	Hidroquímica do Sistema Aquífero Costeiro.....	34
2.3.3	Avaliação da Ocorrência de Cloretos nas Águas Subterrâneas .....	36
3	METODOLOGIA .....	38
3.1	Levantamento de Dados Existentes.....	38
3.2	Levantamento de Campo .....	39
3.3	Elaboração do Banco de Dados .....	41
3.4	Caracterização Geológica .....	42
3.5	Caracterização Hidrogeológica .....	43
3.6	Caracterização Hidroquímica e da Qualidade da Água.....	44
3.7	Análise da Ocorrência de Cloretos.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
4.1	Caracterização Geológica .....	45
4.1.1	Formação Serra Geral .....	46
4.1.2	Formação Botucatu.....	49
4.1.3	Sistema Laguna-Barreira III .....	53
4.1.4	Sistema Laguna-Barreira IV .....	55
4.2	Caracterização Hidrogeológica .....	56
4.2.1	Sistema Aquífero Guarani .....	57

4.2.2	Sistema Aquífero Costeiro .....	60
4.3	Avaliação Hidroquímica e da Qualidade da Água Subterrânea.	63
4.3.1	Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani .....	63
4.3.1.1	Hidroquímica do SAG com mistura de águas.....	70
4.3.2	Hidroquímica do Sistema Aquífero Costeiro.....	74
4.4	Avaliação da Ocorrência de Cloretos .....	78
5	CONCLUSÕES.....	85
	REFERÊNCIAS .....	87

# 1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas estão atreladas ao ciclo hidrológico, no entanto, com ênfase em sua fração terrestre, já que as mesmas têm sua origem vinculada à precipitação e por consequência a infiltração e percolação entre os poros da camada vadosa à zona freática. Com isso, vemos que 95% da água doce mais ativa é representada pelas águas que circulam em subsuperfície, o que demonstra seu potencial em termos de reservatório quando comparada às águas superficiais. (FREEZE & CHERRY, 1979).

Dada a sua importância como reservatório, as águas subterrâneas podem apresentar uma composição química variada, já que o meio em que circulam tem grande influência sobre sua assinatura química. Dessa forma, vemos que a qualidade das águas pode ser muito afetada não somente pela ação antrópica, mas também pela interação com os materiais do espaço em que permeiam, a partir de elementos que naturalmente ali estão. A qualidade das águas subterrâneas por sua vez é classificada atualmente pela resolução CONAMA nº 396 de 2008, Capítulo II, Art. 3º (CONAMA, 2008). As águas são divididas em classes, de modo que são classificadas de acordo com problemas de qualidade de água provocados por ações antrópicas ou características hidroquímicas naturais, além de uma classe especial que garante a preservação de ecossistemas que pertencem a unidades de conservação vinculadas a um determinado aquífero.

A região de estudo é abrangida pelos Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG), Guarani (SAG) e Quaternário Costeiro (SAQC) de acordo com o mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul (MACHADO & FREITAS, 2005).

Com a perfuração de poços tubulares, os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani têm grande importância quanto ao abastecimento público, industrial e como fins de irrigação ao longo da metade norte do Estado. O SASG pode ser considerado como do tipo fraturado, associado principalmente às rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral, condicionado basicamente por estruturas tectônicas como zonas de fraturas, além de estruturas primárias como zonas vesiculares, brechadas, amigdalóides, de diáclases, ou também disjunções horizontais quanto verticais (REGINATO *et al.*, 2012). Enquanto que o SAG, constitui-se como um aquífero do tipo granular, com porosidade primária e secundária, sendo a última oriunda de estruturas tectônicas. O aquífero apresenta grande variação vertical e lateral, já que abrange diversas formações geológicas da Bacia do Paraná. No município de Terra de Areia, este aquífero é associado à Fm. Botucatu, uma sequência sedimentar formada em um ambiente desértico, com uma vasta ocorrência de dunas eólicas que posteriormente foram recobertas pelos derrames de lava basáltica da Fm. Serra Geral. A Fm. Botucatu é constituída em grande parte por arenitos quartzo-feldspáticos médios a finos, bem selecionados, de



coloração rosa-avermelhada, muitas vezes apresentando estruturas de estratificação cruzada de médio a grande porte (DA SILVA & SCHERER, 2000).

Para este estudo, o SAQC será considerado como Sistema Aquífero Costeiro (SAC), como foi definido por Troian et al (2020). O SAC é extremamente importante para as comunidades que habitam a região costeira, já que seu uso, a depender da qualidade da água, é destinado principalmente para o abastecimento urbano e doméstico. É composto essencialmente por camadas de areias inconsolidadas finas a médias, intercaladas por sedimentos síltico-argilosos. Neste aquífero, geralmente encontram-se salinidades inferiores a 400 mg/l, além também de algumas localidades apresentarem águas altamente cloretadas com maior teor salino, assim como em alguns casos uma quantidade de sólidos totais dissolvidos variando entre 600 e 2000 mg/l (MACHADO & FREITAS, 2005).

Diversos fatores afetam a qualidade das águas subterrâneas, como agentes contaminantes ou também características naturais do aquífero. De acordo com Reginato *et al.*, (2008), existem diversas formas de captação ao longo da planície costeira, sendo muito comuns o do tipo ponteira, os quais apresentam uma pequena profundidade e geralmente estão próximos a fontes de contaminação. Dessa forma, a qualidade da água nessas condições pode ser muito prejudicada. Ainda, os aquíferos do SAC podem apresentar características naturais que afetam a qualidade da água, como é o caso da salinização ou presença de ferro e manganês (REGINATO *et al.*, 2009; 2008), assim como a presença de cloretos.

A água subterrânea é um recurso fundamental para região que está totalmente inserida na bacia hidrográfica do rio Tramandaí, já que a mesma é integralmente abastecida por estas águas através da rede de distribuição da CORSAN (essencialmente na zona urbana, enquanto a zona rural é suprida basicamente por poços comunitários ou individuais). No entanto, o alto nível de cloretos observados em poços de monitoramento da rede RIMAS e CORSAN indicam cautela quanto ao uso da água para abastecimento e outras atividades na região (SEMA, 2005).

Colocada a importância das águas subterrâneas, o presente trabalho busca avaliar a hidroquímica e qualidade das águas, além de buscar entender a ocorrência e origem dos cloretos, os quais podem ser bastante prejudiciais de acordo com o uso empregado no município de Terra de Areia.

## **1.1 Localização**

A área de estudo está localizada no município de Terra de Areia, região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, inserida na Latitude 29° 34' 48" Sul e Longitude 50° 04' 12" Oeste (Figura 1).

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020) a região apresenta uma área de 142,27 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 11.323 habitantes (IBGE, 2021). A região ainda apresenta 21,7% dos domicílios com esgotamento sanitário adequado. Também, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) o município de Terra de Areia está entre 32% dos municípios que necessitam de adequação do sistema de abastecimento existente (previsto para 2025), o qual atualmente é um sistema de fornecimento de água isolado totalmente subterrâneo (ANA, 2015).

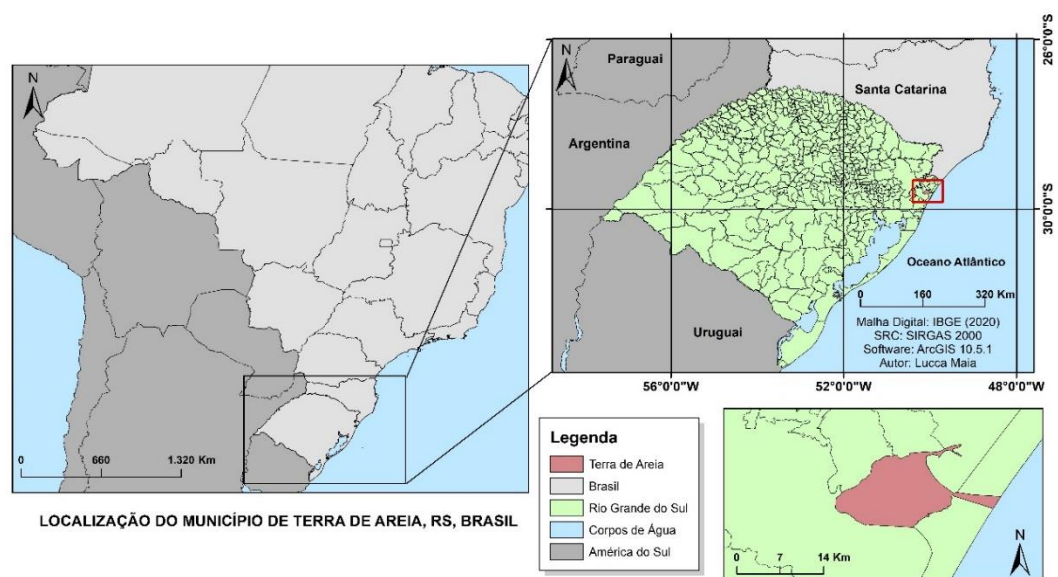


Figura 1. Mapa da localização da área de estudo, município de Terra de Areia, RS. Elaboração própria a partir de dados do IBGE (2020).

## 1.2 Caracterização do Problema

A região costeira é em grande parte constituída pelo SAC, o qual apresenta grande variação vertical e horizontal quanto a sua sedimentação. Logo, tem como consequência uma maior alteração hidroquímica ao longo do aquífero. Além disso, a ocorrência do SAG nos níveis inferiores somada a diferentes condições hidráulicas, pode ocasionar a mistura de águas entre os dois sistemas aquíferos, o que contribui para diferenciação na composição da água subterrânea. A interação das águas subterrâneas com os sedimentos caracterizará sua composição, muito pela sua granulometria e ambiente de sedimentação, além da interação com a camada do aquífero, o tempo de residência e grau de confinamento das águas também é um fator importante, já que pode ser uma condicionante muito variável dependendo do tipo de aquífero. Outros fatores importantes estão associados aos fenômenos como a intrusão salina e outros desencadeados pelas ações antrópicas (contaminação e avanço da cunha salina por bombeamento).

Dessa forma, para área de estudo, verifica-se também uma heterogeneidade referente às camadas aquíferas com diferentes características geológicas e hidrogeológicas. Assim, acabam por dar ao sistema aquífero uma grande variação hidroquímica que se observa na composição, qualidade e concentração de cloretos. Com isso, o ambiente de sedimentação tem um papel muito importante para o entendimento da qualidade das águas como um todo, já que fazem parte dos sistemas laguna-barreira. Portanto, é possível que camadas depositadas em um determinado tipo de ambiente e localizadas em maiores profundidades, possam apresentar problemas de qualidade, mais altos níveis de cloretos e outros elementos, com mais facilidade.

### **1.3 Objetivos**

Este estudo tem como objetivo avaliar a composição, qualidade e concentração de cloretos das águas subterrâneas do município de Terra de Areia.

Assim, algumas metas devem ser notadas:

- Avaliação geral da captação e usos das águas subterrâneas da região;
- Determinação e caracterização dos Sistemas Aquíferos Costeiro, e Guarani na área de estudo;
- Identificação de padrões hidroquímicos e da qualidade da água subterrânea;
- Avaliação quanto à ocorrência e origem de cloretos nas águas subterrâneas do SAC e SAG.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Contexto geológico**

O município de Terra de Areia está inserido no contexto da Bacia do Paraná assim como na Bacia de Pelotas. Na região oeste, existem afloramentos de rochas basálticas pertencentes à Fm. Serra Geral, além da ocorrência de arenitos da Fm. Botucatu em subsuperfície. Em direção à porção leste predominam os sedimentos inconsolidados cenozóicos, pertencentes em grande parte ao Sistema Laguna-Barreira III e IV.

A Bacia do Paraná (Figura 2) é tida como um importante depocentro intracratônico formado durante a sinéclise da Plataforma Sul-americana. Tem como registro depósitos do Ordoviciano ao Cretáceo com aproximadamente 7500 m de espessura, em uma área aproximada de 1,5 milhão de metros quadrados, englobando países como Argentina, Uruguai e Paraguai, enquanto que no Brasil, estende-se desde o Estado

de Goiás até o Rio Grande do Sul (MILANI *et al.*, 2007). Milani (1997) dividiu as unidades de maior hierarquia em superseqüências como: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Siluriano – Devoniano), Gondwana I (Carbonífero – Permiano), Gondwana II (Triássico), Gondwana III (Jurássico – Cretáceo) e Bauru (Cretáceo). Dessa forma, a unidade aloestratigráfica Gondwana III tem ocorrência na área de estudo, incluindo as Formações Serra Geral e Botucatu.

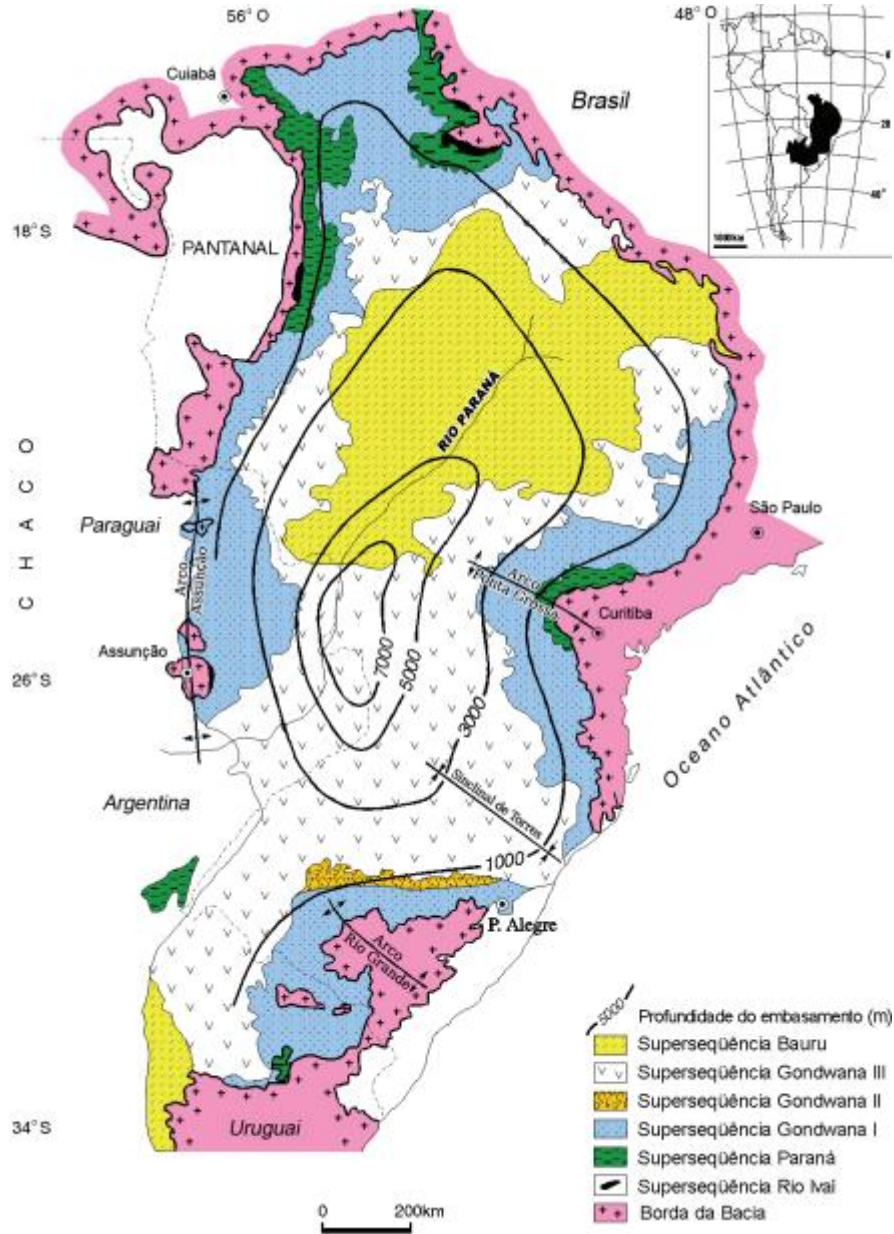


Figura 2. Mapa da Bacia do Paraná com sua localização ao longo do continente sul-americano

### 2.1.1 Bacia do Paraná

Como mencionado na seção 2.1, a região de estudo é abrangida pela Supersequência Gondwana III, com a sua porção inferior constituída por um pacote de arenitos finos a médios da Formação Botucatu. A Fm. Botucatu representa o ambiente desértico que esteve presente no Gondwana, que antecede a ruptura durante o Mesozóico do paleocontinente. Em direção ao topo da unidade os arenitos dão início à intercalação com os primeiros fluxos de lava que marcam os estágios iniciais do *breakup*. O evento ígneo ocorreu durante o Eocretáceo, resultando em um extenso pacote de lavas atribuídas à Formação Serra Geral (FSG). Estes pacotes se sobrepõem aos sedimentos paleozóicos da Bacia do Paraná, com espessuras que atingem até 1.500 m em determinadas regiões, com uma rede de diques e *sills* que se colocaram intercalados aos pacotes sedimentares (MILANI, 2007).

A Fm. Botucatu tem exposições ao longo das escarpas da Fm. Serra Geral, apresentando uma espessura que varia de 0 a 120 m que é limitada em sua porção basal por uma discordância regional que recobre diferentes unidades estratigráficas. Em sua porção superior, é recoberta de forma concordante com os derrames de lava basáltica da Fm. Serra Geral, que preservaram integralmente as feições presentes nas dunas eólicas na maioria dos casos (SCHERER, 2021). Na porção basal do pacote são observados depósitos espessos de lençóis de areia eólicos e também depósitos de interdunas com sinais de inundação os quais são recobertos por *sets* sobrepostos de estratos cruzados de grande porte, entendidos como depósitos residuais de dunas eólicas de diferentes morfologias em decorrência da variação no sentido preferencial dos paleoventos (SCHERER, 2002).

No Rio Grande do Sul não existem muitos relatos de fósseis presentes nos estratos da Formação, a não ser pela presença de pegadas de tetrápodes fósseis (SCHERER, 2021). O registro icnológico concentra-se principalmente no Estado de São Paulo, atribuído a pegadas de dinossauros terópodes e ornitópodes, assim como mamíferos (LEONARDI *et al.*, 2007; FRANCISCHINI *et al.*, 2015). Quanto à idade, sua determinação é de grande dificuldade, já que as datações são relativas, relacionadas essencialmente às datações radiométricas  $Ar^{40}/Ar^{39}$  feitas nos derrames vulcânicos da Fm. Serra Geral que apontam uma idade próxima a 134 Ma (THIEDE & VASCONCELLOS, 2010). Além disso, a idade atribuída ao início da sedimentação é imprecisa, já que é associada aos registros icnofósseis de vertebrados identificados nas camadas sedimentares de origem eólica, com isso, tem-se uma idade Neojurássica-Eocretácea para a Formação Botucatu de acordo com Bonaparte (1996) e Milani (2007). Porém, como discutido anteriormente por Scherer (2002), devem ser levados em conta a pequena espessura ou ausência de supersuperfícies (as quais representam grandes hiatos no tempo geológico) e a relação dos arenitos com as lavas, que representam um intervalo de tempo mais reduzido para Fm. Botucatu, com no máximo algumas centenas de milhares de anos antes do vulcanismo Serra Geral.

Scherer (1998) definiu para Fm. Botucatu no Rio Grande do Sul três associações faciológicas (AF1, AF2 e AF3). A AF1 é composta por arenitos grossos a conglomeráticos, entendidos como depósitos do tipo lençóis de areia e fluxos torrenciais os quais ocorrem de forma descontínua com espessuras que dificilmente ultrapassam um metro, próximas à discordância basal da sequência. As demais associações (AF2 e AF3) representam a variação da morfologia das dunas de acordo com o sentido preferencial dos paleoventos (dunas crescentes simples e compostas; dunas lineares e complexas, respectivamente). Além disso, as duas últimas associações são compostas por arenitos de granulometria fina à grossa, de coloração rosa claro a avermelhado, bem selecionado, com grãos arredondados e de alta esfericidade, além de uma estratificação planar ou tangencial de grande porte.

Quanto à Fm. Serra Geral, corresponde a um grande evento de magmatismo também associado à Supersequência Gondwana III. A Formação é composta predominantemente por basaltos e andesitos basálticos (acima de 90% em volume). A porção ácida é de ocorrência restrita ao topo dos derrames principalmente nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina como definido por Melfi *et al.* (1988).

O estágio inicial do vulcanismo permitiu o recobrimento dos campos de dunas eólicas ativos da Fm. Botucatu, marcados pela interação lava-sedimento, a qual possibilitou a preservação parcial ou total das feições presentes nas dunas em certas regiões como observado por Scherer (2002). Ainda, se observa na intercalação com os sedimentos a sua importância para preservação localmente de texturas *pahoehoe* o que indica o tipo de erupção para as lavas iniciais (SCHERER, 2002).

As rochas do vulcanismo Serra Geral foram subdivididas em grupos de acordo com as características geoquímicas das mesmas, mais especificamente atrelado ao conteúdo de  $TiO_2$ : com basaltos de alto Ti, apresentando teores de óxido de titânio acima de 2% e basaltos baixo Ti, com teores abaixo de 2% para óxido de titânio (BELLINI *et al.*, 1984). Além disso, seis grupos de rochas ou fácies foram apresentadas por Peate *et al.* (1992): Paranapanema, Pitanga e Ribeira, representativos da porção norte (com razões  $Ti/Y > 300$ ), já os representantes da região mais ao sul (com razões  $Ti/Y > 300$ ) sendo Gramado, Esmeralda e Urubici.

O mapa elaborado pela CPRM (2008) demonstra que para região de Terra de Areia o grupo mais representativo na área é atribuído à Fácies Gramado. Os derrames consistem em basaltos granulares finos a médios, melanocráticos cinza, com horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilita e saponita, além de apresentarem estruturas de fluxo e *pahoehoe* bastante comuns, somando-se a intercalações de lavas e arenitos Botucatu.

### **2.1.2 Planície Costeira**

De acordo com Ghignone (1960) a Bacia de Pelotas pode ser definida como uma extensa bacia preenchida por sedimentos cenozóicos. A bacia está inserida entre o Alto de Florianópolis (GAMBOA & RABINOWITZ, 1981) e o Alto de Polônio (URIEN & MARTINS, 1978), o segundo já em território uruguaio. A sua parte emersa, situa-se entre o Cabo de Santa Marta (Santa Catarina) e La Coronilla (Uruguai), estendendo-se por 770 km com uma largura variando entre 10 e 15 km, podendo chegar a 100 km próximo a Porto Alegre.

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) evoluiu ao longo do Quaternário devido às variações glacio-eustáticas do nível do mar além de pequenas oscilações climáticas. A partir disso, os depósitos foram agrupados em sistemas deposicionais, dividindo-os em quatro sistemas laguna-barreira (barreiras I, II, III e IV) transgressivos-regressivos (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000), correlacionáveis às curvas isotópicas de oxigênio, ajustadas para o pleistoceno de acordo com Imbrie *et al.*, (1984), além dos sistemas de leques aluviais contínuos ao longo da faixa mais interna da planície (VILLWOCK *et al.*, 1986).

Os leques aluviais nesta região podem ser considerados como um conjunto de fácies formadas a partir do transporte de sedimentos tendo sua origem nas terras altas do escudo pré-cambriano ao sul da planície, enquanto que ao norte pelo planalto, apresentando assim uma grande variação composicional. Em sua porção mais proximal predominam basicamente processos gravitacionais como a queda de blocos, além de fluxo de detritos como talus, coluviões e eluviões, gradando para depósitos em meio aquoso, como aluviões. Ainda, se observa que, durante as fases mais úmidas do clima, os leques aluviais apresentaram-se mais suavizados e alterados, formando uma rampa de depósitos aluviais mergulhando no sentido da bacia (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000).

Os Sistemas Laguna-Barreiras I, II e III são classificados como sistemas deposicionais pleistocênicos (VILLWOCK *et al.*, 1986), considerados mais jovens à medida que se aproximam da linha de costa atual, representada pela barreira IV (Figura 3).

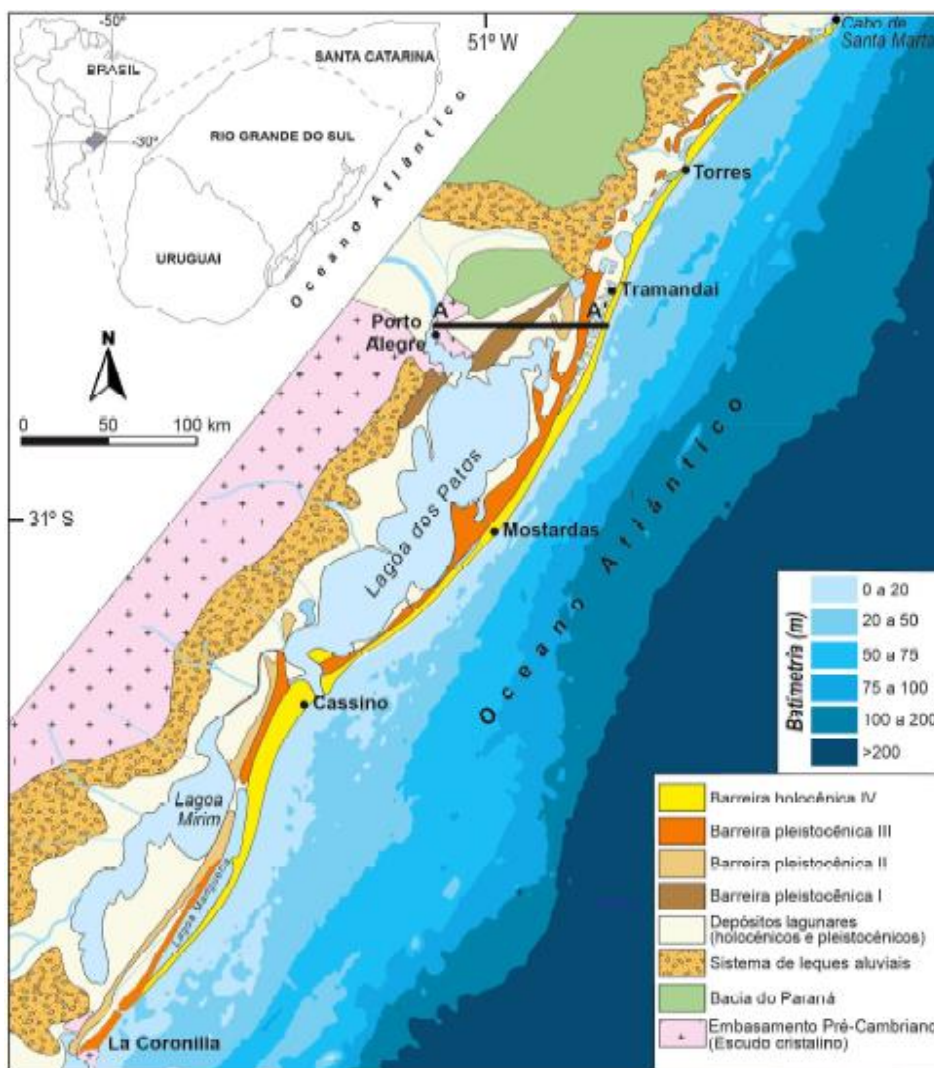


Figura 3. Mapa geológico da planície costeira, representando as barreiras holocênica (IV) e pleistocênicas (I, II e III), como também os sistemas de leques aluviais (Modificado de DILLENBURG & BARBOZA, 2014; BARBOZA et al., 2021).

A Barreira I, atualmente situada na poro NW da PCRS, embora possivelmente já tenha tido uma maior distribuio, foi formada a partir da deposio de sedimentos arenosos eolicos sobre o embasamento cristalino (TOMAZELLI et al., 2007). Quanto a sua composio, a fácies sedimentar desse sistema  constituído por areias quartzofeldspticas, bem arredondadas, parcialmente consolidadas com uma matriz síltico-argilosa originada pela infiltrao de argilas e posterior diagnese, além da presença de nódulos ferruginosos disseminados entre os sedimentos (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000). Este sistema representa o primeiro evento transgressivo-regressivo, correlacionado ao estágio isotópico de oxignio 9, a partir do estudo de Imbrie et al. (1984), que marcam as variaoes do nível do mar de acordo com as glaciaoes, há aproximadamente 325 Ka (ROSA et al., 2017).

O Sistema Laguna-Barreira II  marcado pelo segundo evento transgressivo-regressivo, que posteriormente foi correlacionado com o estágio isotópico do oxignio



7, há aproximadamente 230 Ka, quando o nível relativo do mar estava 9,5 m acima do nível atual, segundo Rosa *et al.*, (2017). Apresenta fácies praias e eólicas com areias quartzo-feldspáticas, castanho-amareladas, além também de apresentarem uma matriz siltico-argilosa diagenética como na Barreira I. Atualmente, está distribuída erráticamente na planície costeira, já que se apresenta como um pontal arenoso próximo a Lagoa dos Barros, o qual mais ao sul forma o primeiro isolamento da Lagoa Mirim, pelo antigo sistema de ilhas-barreira no passado (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000).

A Barreira III marca o último evento transgressivo-regressivo do Pleistoceno, em torno de 125 Ka de acordo com o subestágio isotópico de oxigênio 5e (Tomazelli & Dillenburger, 2007). Este evento é um grande marco no desenvolvimento da PCRS, já que foi o momento em que a consolidação do Sistema Lagunar Patos-Mirim se estabeleceu. Diferentemente das Barreiras I e II, a Barreira III estende-se quase que constantemente ao longo da planície costeira, com características estratigráficas segundo Tomazelli *et al.*, (1982), marcadas por fácies praias e marinho raso, com uma cobertura de depósitos eólicos. Estes sedimentos apresentam-se como areias essencialmente quartzosas, muito bem selecionadas e alguns tipos de estratificação. Como há a presença de icnofósseis do tipo ophiomorpha (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000), garantem um ambiente marinho raso, situado 8 metros acima do nível atual de acordo com Rosa *et al.*, (2017).

Por fim, já no período holocênico, a Barreira IV marca o estágio isotópico de oxigênio 1, indicando o último evento transgressivo pós-glacial (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000). Esta barreira desenvolveu-se a partir de dois processos principais relacionados a morfologia da linha de costa, ou seja, locais considerados como protuberâncias permitiram a erosão e, por consequência, sistemas retrogradantes. O contrário ocorre em regiões que apresentam reentrâncias na linha de costa, favorecendo a deposição e, portanto, um sistema do tipo progradante (DILLENBURG *et al.*, 2000). As areias presentes nesse sistema são muito finas e majoritariamente quartzosas, com a concentração de minerais pesados em certas regiões (VILLWOCK *et al.*, 1979), além da presença de cascalhos bioclásticos em determinadas regiões, formados por conchas de moluscos (CALLIARI & KLEIN 1993).

A partir da análise do mapa de geologia regional elaborado pela CPRM (2008), observa-se que na área de estudo são encontrados depósitos de sedimentos oriundos principalmente da barreira III, além de sedimentos holocênicos, como podemos ver no mapa (Figura 4). Na porção central do município concentram-se depósitos de turfeiras, além de depósitos eólicos e praias pertencentes à barreira III. Grande parte da área compõe-se de depósitos de planície de inundação holocênicos, como também, mais próximo à linha de costa, apresenta depósitos praias e eólicos oriundos da barreira IV.

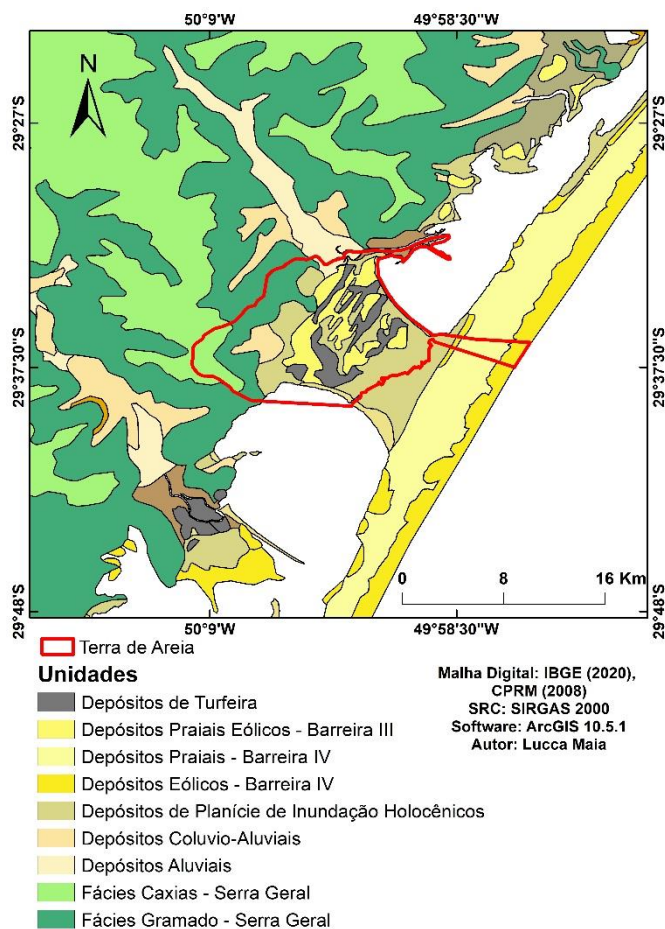


Figura 4. Mapa da geologia regional para área de estudo, elaboração própria a partir de dados da CPRM (2008) e IBGE (2020).

## 2.2 Contexto Hidrogeológico

Foi a partir de Hausman (1960) que a primeira análise sobre as águas subterrâneas do Estado do Rio Grande do Sul teve início. Assim, Hausman (1964) procurou sistematizar as principais ocorrências de aquíferos do Estado, o que permitiu classificar os mesmos em províncias hidrogeológicas, as quais referem-se especificamente a uma superfície da Terra (LISBOA *et al.*, 2004).

Subsequentemente, Lisboa *et al.*, (2004) procuraram dar continuidade com uma nova abordagem à hidrogeologia regional do Estado. Lisboa *et al.*, (2004) optaram neste trabalho pela utilização dos Sistemas Aquíferos, os quais abrangem dimensões de espaço e tempo, com a utilização de parâmetros geológicos como o material estratigráfico, estrutural e geomorfológico.

De acordo com o mapa hidrogeológico da região, a área de estudo abrange os Sistemas Aquíferos Serra Geral, Costeiro e Guarani, de tal modo que o último se encontra confinado sob os derrames da Fm. Serra Geral e os sedimentos inconsolidados da planície costeira (Figura 5)

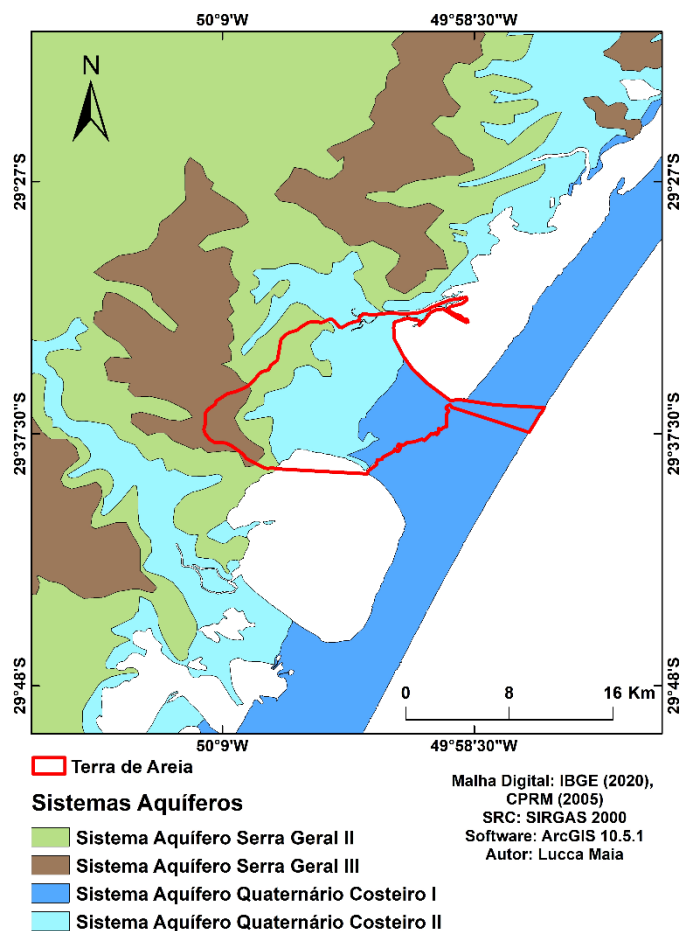


Figura 5. Mapa hidrogeológico da área de estudo, elaboração própria a partir de dados da CPRM (2005) e IBGE (2020).

### 2.2.1 Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é a denominação dada pelo geólogo uruguaio Danilo Anton, em 1996 e está associado às sequências sedimentares da Bacia do Paraná e Bacia do Chaco-Paraná, cobrindo áreas do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. No Estado do Rio Grande do Sul, o aquífero possui uma porção aflorante correspondente à depressão central, entre os municípios de Santana do Livramento e Santo Antônio da Patrulha, e outra confinada, desde a fronteira oeste ao litoral norte do Estado, configurando uma unidade hidroestratigráfica (MACHADO, 2006). Ao todo, o SAG abrange uma área de 1.195.500 km<sup>2</sup>, dos quais 157.600 km<sup>2</sup> estão inseridos no RS, uma área bastante estratégica quanto à irrigação, lazer, abastecimento urbano e industrial (REBOUÇAS & AMORE, 2002).

Este aquífero apresenta uma boa recarga, principalmente em suas regiões aflorantes, mas também uma parte das águas que recarregam esse aquífero são originadas por meio de um fluxo vertical através das fraturas presentes no Sistema Aquífero Serra Geral (Fernandes *et al.*, 2012). De acordo com Rebouças (1976), as recargas

diretas do aquífero chegam a 160 km<sup>3</sup> por ano, indicada pelas descargas de base dos rios que drenam esta área.

O SAG apresenta um potencial geotermal relevante, já que à medida que a água se infiltra e atinge grandes profundidades, está sujeita ao gradiente geotérmico da região, na ordem de 1°C a cada 35 m de profundidade (BARNER, 1981). Com isso, a grande variabilidade na extensão vertical do SAG pode proporcionar temperaturas de até 59,6°C dependendo da região perfurada, já que o aquífero pode atingir até 600 m de extensão vertical e em média possuir 250 m de espessura (MACHADO, 2005).

Apesar de ser caracterizado como um aquífero granular, o SAG tem um forte controle tectônico, o qual tem grande influência sobre o seu comportamento hidráulico. O controle estrutural ao longo das unidades hidroestratigráficas pode condicionar o fluxo das águas subterrâneas, a partir de fraturas e falhas, o que permite não somente seu condicionamento, mas também a interceptação de diferentes camadas aquíferas a qual pode ocasionar misturas de águas, muito comum ao longo do SASG e SAG (SOARES, 2007).

De acordo com Machado (2005), além da compartimentação tectônica, o SAG engloba diversas sequências sedimentares que caracterizam a heterogeneidade do aquífero ao longo de toda sua extensão, e assim, no Estado do RS observa-se a divisão em unidades hidroestratigráficas, de acordo com as formações geológicas, que englobam as unidades Botucatu, Guará, Arenito Mata, Caturrita, Alemoa, Passo das Tropas, Sanga do Cabral e Rio do Rasto.

Para a região de Terra de Areia o SAG encontra-se na condição confinado, tanto pelos derrames da FSG, quanto pelos sedimentos inconsolidados da Planície costeira. Nesta região, a única unidade hidroestratigráfica captada é a Botucatu, composta pelos arenitos eólicos que recobrem os sedimentos do Grupo Rosário do Sul, além de se estender sob os derrames do FSG (MACHADO, 2005).

No geral, este aquífero apresenta uma condutividade hidráulica na ordem de 8 m/dia, com valores de transmissividade que podem variar entre 350 e 550 m<sup>2</sup>/dia. Ainda, a porosidade efetiva pode variar entre 10 a 20%, valores considerados razoáveis para prospecção, também somando-se ao coeficiente de armazenamento que apresenta valores de 10<sup>-3</sup> e 10<sup>-6</sup> a depender do grau de confinamento (AURELIA, 1989).

Segundo Machado (2005), a unidade hidroestratigráfica Botucatu em áreas confinadas apresenta sua maior distribuição, além de ser o principal aquífero quanto à captação por poços tubulares profundos. Nesta unidade podem ser obtidas capacidades específicas na ordem de 5 a 10 m<sup>3</sup>/h/m para região oeste, nas demais regiões varia entre 0,5 e 2 m<sup>3</sup>/h/m, o que inclui a porção nordeste do Estado.

## 2.2.2 Sistema Aquífero Costeiro

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o Governo do Rio Grande do Sul, com a participação de outros órgãos do Estado, finalizaram em 2005 o projeto para criação do Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, onde foi possível a integração de dados hidrogeoquímicos, hidrodinâmicos, hidrogeológicos e da qualidade da água a partir de poços cadastrados em diversas regiões do Estado. A partir disso, foi possível a delimitação de aquíferos que apresentam características semelhantes, como é o caso do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e II (SAQC I e II). (MACHADO & FREITAS, 2005).

A região de estudo é quase totalmente abrangida por ambos aquíferos costeiros (SAQC I e II), já que uma pequena porção engloba o Sistema Aquífero Serra Geral II e III (Figura 5).

Machado & Freitas (2005) definiram subgrupos para os sistemas aquíferos do Rio Grande do Sul, mas destacam-se aqui aqueles relacionados ao SAQC I e II, aquíferos granulares em rochas ou sedimentos de alta a média possibilidade para águas subterrâneas e aquíferos granulares em rochas ou sedimentos de média a baixa possibilidade para águas subterrâneas, respectivamente.

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I apresenta aquíferos relacionados aos sedimentos da região costeira que vão do Chuí até Torres, constituído essencialmente por camadas arenosas inconsolidadas, de granulometria fina a média, geralmente intercaladas por camadas siltico-arenosas e argilosas. Estes aquíferos apresentam capacidades específicas elevadas que podem ultrapassar 4 m<sup>3</sup>/h/m dependendo do poço observado (MACHADO & FREITAS, 2005).

Quanto ao Sistema Aquífero Quaternário II, consiste em aquíferos relacionados aos sedimentos costeiros estendendo-se de Santa Vitória do Palmar até Torres. Diferentemente do SAQC I, apresenta areias finas inconsolidadas e argila cinza, inicialmente apresentando camadas pelíticas bem cimentadas. Suas capacidades específicas são geralmente baixas a médias, variando entre 0,5 e 1,5 m<sup>3</sup>/h/m (MACHADO & FREITAS, 2005).

Posteriormente, Troian *et al.*, (2020), procuraram compreender melhor como variam as camadas verticalmente a partir das suas heterogeneidades, o que auxiliou no entendimento da dinâmica das águas subterrâneas. Assim, foi possível definir unidades hidroestratigráficas presentes no sistema aquífero costeiro no litoral norte a partir da classificação de Diniz *et al.* (2014), onde a menor classe hierárquica não necessariamente corresponde aos limites estratigráficos já estabelecidos.

A partir de dados de poços profundos presentes na região, além de furos de sondagem e perfilagens geofísicas, Troian *et al.*, (2020) verificaram que nesta região o SAC apresenta espessuras que podem chegar até 490 metros no sentido de Osório.

Já em sentido nordeste a espessura do aquífero diminui gradativamente, até o afloramento da Bacia do Paraná na região de Torres. Assim, vemos que o SAC é constituído por um extenso pacote de sedimentos inconsolidados não restritos somente ao Quaternário, além de recobrirem o Sistema Aquífero Guarani como inicialmente foi previsto por Lisboa *et al.*, (2004) e Machado (2005).

Para divisão de unidades hidroestratigráficas, Troian *et al.*, (2020) procuraram visualizar camadas de sedimentos que apresentassem características hidrogeológicas semelhantes a partir de uma escala regional. Assim, dada a heterogeneidade dos pacotes sedimentares, foi possível estabelecer ao todo quatro unidades hidroestratigráficas, com o Sistema Aquífero Guarani em sua base, como está representado no bloco diagrama (Figura 6).

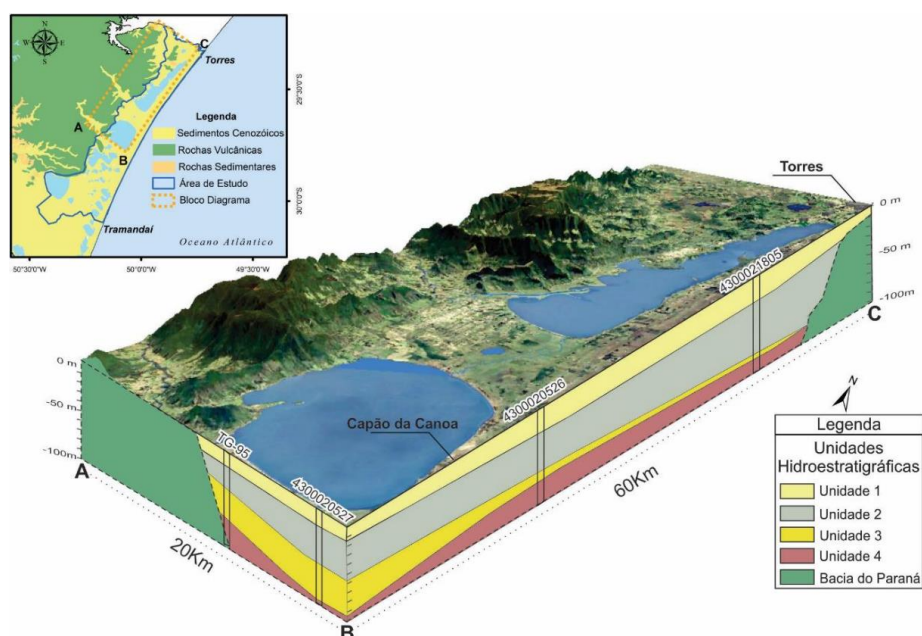


Figura 6. Bloco diagrama adaptado de Troian *et al.* (2020), o qual representa o modelo conceitual para região norte da área de estudo e demonstra as unidades hidroestratigráficas observadas.

Ainda, para Troian *et al.*, (2020), a unidade hidroestratigráfica 1 é caracterizada por sedimentos inconsolidados arenosos, dos quais estão relacionados muito provavelmente aos sistemas laguna-barreira III e IV. Os sedimentos apresentam uma certa homogeneidade e espessuras que ficam entre 15 e 30m. A unidade hidroestratigráfica 2 representa depósitos marinhos com sedimentos argilosos e lentes/camadas de areias finas a muito finas, com espessuras podendo chegar a 45m para leste e diminuição gradativa para oeste. Em relação à unidade hidroestratigráfica 3, a mesma constitui-se basicamente por sedimentos arenosos de granulometria média a grossa, variando de 5 a 40m de espessura com continuidade lateral ao longo da região. Na região específica de Capão da Canoa pode apresentar areias grossas a muito grossas

podendo representar sistemas aluviais (paleocanais) de acordo com Collischonn (2018). Por fim, a unidade hidroestratigráfica 4 apresenta camadas argilosas, podendo chegar a mais de 100m de espessura. Pela escassez de dados, a unidade 4 foi considerada como contato inferior do SAC, embora alguns dados sugerem a ocorrência de intercalações de sedimentos arenosos e argilosos.

### 2.3 Contexto Hidroquímico e da Qualidade da Água Subterrânea

De acordo com Sena (2011), a hidroquímica das águas subterrâneas busca caracterizar e compreender como as substâncias químicas permeiam em diferentes aquíferos. Além disso, a condição química das águas pode afetar a sua qualidade, que por sua vez pode ser definida através do impacto causado de acordo com a sua composição.

Ainda, para Sena (2011), a composição das águas está essencialmente atrelada à interação geoquímica das mesmas com as rochas ou sedimentos constituintes do aquífero. Assim, a partir dessa interação, verifica-se que 90% dos íons encontrados nas águas subterrâneas são formados por um determinado grupo destes constituintes. Dentre os cátions destacam-se o sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), magnésio ( $\text{Mg}^+$ ) e cálcio ( $\text{Ca}^+$ ), enquanto que dentre os ânions verifica-se a presença principalmente dos cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ).

A qualidade da água é definida através de diversos fatores, dentre eles podem ser destacados ações antrópicas danosas que atingem um aquífero dada a sua vulnerabilidade, além dos constituintes naturais presentes no mesmo, condicionados pela interação geoquímica das águas com o ambiente circundante (BONOTTO, 2006).

A qualidade das águas subterrâneas pode ser classificada a partir da resolução CONAMA nº 396 de 2008, Capítulo II, Art. 3º (CONAMA, 2008) de acordo com seu uso e também com base na necessidade de tratamento. A avaliação por sua vez, tem como base os Valores Máximos Permitidos (VMPs) estabelecidos pela portaria GM/MS Nº 888 em relação ao consumo humano (BRASIL, 2021) para os constituintes das águas subterrâneas. Assim, os VMPs estipulados podem ser comparados com os valores obtidos em uma avaliação de um determinado poço ou aquífero, que trará a análise para potabilidade das águas.

O uso do solo é um fator muito importante para o entendimento dos problemas que afetam a qualidade das águas subterrâneas, já que áreas com atividade agrícola geralmente geram contaminação seja pelo uso de fertilizantes, agrotóxicos ou outros ativos (FILIZOLA *et al.*, 2002). Além disso, outra fonte de contaminação relevante são os esgotos que, quando lançados sem nenhum controle, tem grande potencial para contaminar aquíferos e rios (JALALI, 2006).

### **2.3.1 Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani**

Assim como Hausman (1995), Reginato *et al.*, (2013) evidenciam a variabilidade no padrão hidroquímico das águas do SAG, principalmente associadas ao tempo de residência das mesmas na rocha, assim como o grau de confinamento presente no aquífero.

Machado & Freitas (2005) apontam, com o uso do Diagrama Piper (1944), para ocorrência de diferentes classes de águas a depender da unidade hidroestratigráfica captada no SAG, como águas bicarbonatadas cálcicas a mistas ou também águas sódicas a mistas. Estas águas tendem a apresentar águas doces potáveis como indicado em 96,8% das amostras coletadas no trabalho de Machado & Freitas (2005), além de poucas amostras apresentarem alto risco à irrigação, devido à alcalinização e salinização.

Ainda, o estudo de Reginato *et al.* (2013) aponta para a ocorrência de três classes de águas principais para unidade hidroestratigráfica botucatu: bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e sulfatadas ou cloretadas sódicas. Estas variações também foram apontadas por Machado & Freitas (2005), que atribuem a maior concentração de sais nas águas devido ao aumento do grau de confinamento do aquífero, evoluindo para águas sódicas e posteriormente para águas sulfatadas ou cloretadas. A figura (7) exemplifica claramente a variabilidade nos principais cátions e ânions presentes nas águas através do Diagrama de Stiff para o SAG.



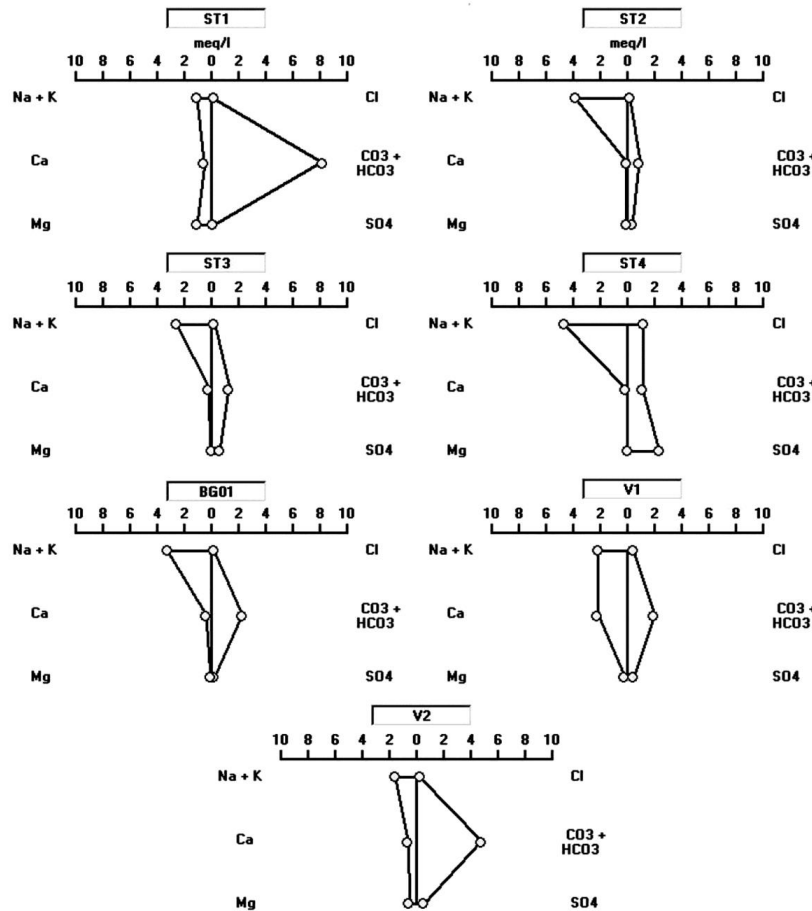


Figura 7. Diagrama Stiff representando as diferentes classes de águas a partir de amostras de água subterrânea do SAG (REGINATO *et al.*, 2013).

As águas do SAG podem apresentar um pH (entre 7,9 e 9,6) e condutividade (270 a 686 uS/cm) mais elevados, dependendo da região e outras características do aquífero. Para a região nordeste do Estado Reginato *et al.*, (2013) atribuem essa ocorrência a uma possível circulação mais lenta, o que permite um contato com a rocha por um período prolongado, bem como a possibilidade de misturas de águas de aquíferos do pré-SAG. Assim é possível ocorrer um aumento da concentração de íons e conseqüentemente maiores quantidades de sódio, bicarbonatos e carbonatos, além de cloretos e sulfatos.

A origem do sódio para o SAG está associada principalmente a misturas de águas presentes no aquífero, atribuída a águas ascendentes do pré-SAG que utilizam grandes falhas como meios para sua ascensão, ocorrendo quando isolinhas potenciométricas do SAG são maiores que a cota de captação do SASG, fazendo com que a salinidade das águas aumente (TEIXEIRA, 2017; TEIXEIRA, 2020). Matos (2020) definiu grupos com características hidroquímicas distintas para o aquífero, C1-SAG (zonas de recarga), C2-SAG (águas mais mineralizadas), C3-SAG e C4-SAG com águas de alto confinamento ou ainda com influência do pré-SAG (com valores elevados de sódio, cloreto, sulfato, fluoreto e condutividade elétrica).

Em sua porção confinada, o SAG é atribuído principalmente a unidade hidroestratigráfica Botucatu/Pirambóia, com salinidades que podem chegar até 400 mg/l, mas em determinadas regiões os sais podem atingir valores acima de 800 mg/l, além de teores elevados de flúor, os quais inviabilizam o uso em abastecimento público (MACHADO & FREITAS, 2005).

### **2.3.2 Hidroquímica do Sistema Aquífero Costeiro**

Assim como características hidrodinâmicas e hidrogeológicas, o estudo de Machado & Freitas (2005) pode estabelecer atributos hidrogeoquímicos dos aquíferos SAQC I e II. O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I, através do gráfico de Piper, concentra principalmente ânions como bicarbonato e cloretos, além de cátions como o sódio. A classificação das águas fica principalmente como bicarbonatadas a cloretadas sódicas e, geralmente, as águas apresentam salinidades inferiores a 400 mg/l, porém, em alguns casos, as águas cloretadas podem apresentar teores salinos mais elevados. Quanto ao SAQC II, apresenta características muito semelhantes ao SAQC I, no entanto, os sólidos totais dissolvidos variam entre 600 e 2000 mg/l.

A partir de um monitoramento quali-quantitativo para a região do litoral norte, Troian *et al.*, (2014) classificou as águas a partir de poços da rede RIMAS e outros cadastrados no SIAGAS. Assim, a partir dos dados obtidos das análises químicas dos poços, as águas foram classificadas como cloretadas sódicas (Figura 8). Além disso, foram encontrados altos valores de ferro nas amostras, acima dos valores de potabilidade, que vai de acordo com a descrição de Reginato *et al.*, (2008), indicando a presença, além do ferro, de manganês e alumínio acima dos VMPs para os aquíferos da região costeira.

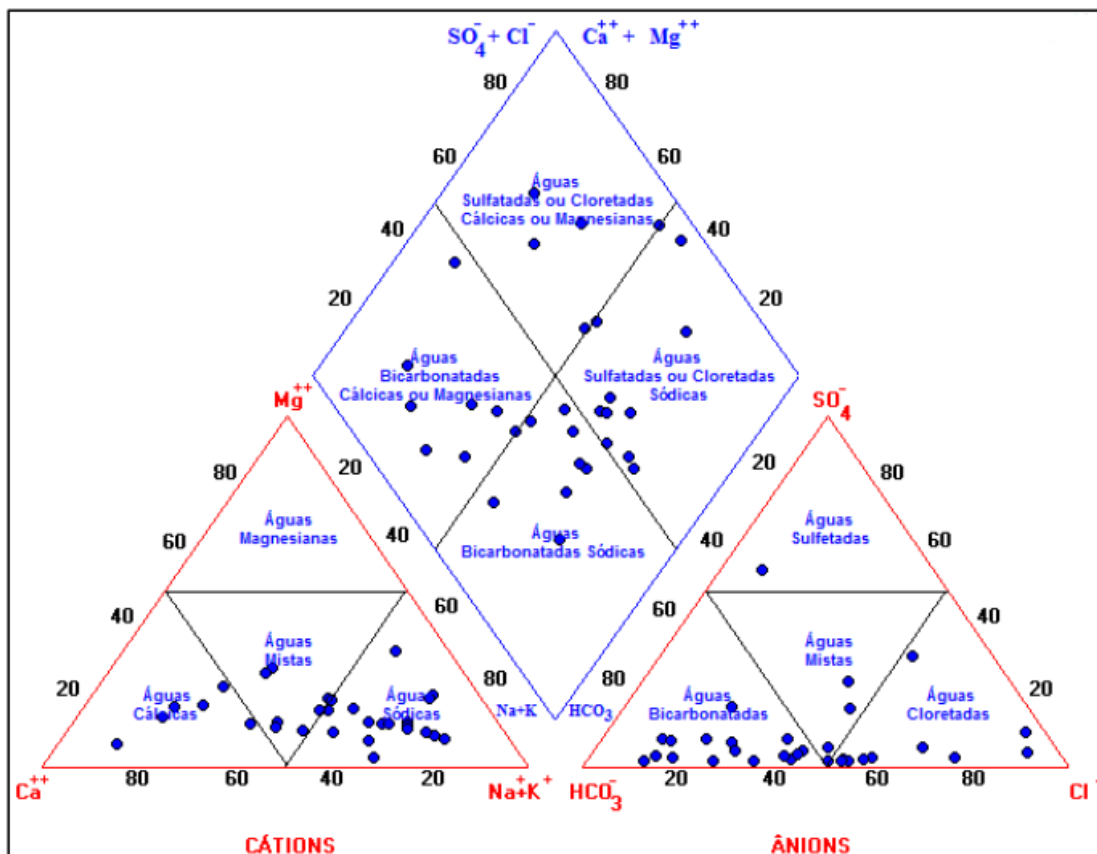


Figura 8. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas da região do litoral norte (adaptado de Troian et al, 2014).

Outros problemas podem afetar a qualidade das águas, como foi observado por Reginato *et al.*, (2009) o SAC pode apresentar águas com risco a salinização quando utilizadas para irrigação, além de apresentarem índices acima dos VMPs. Neste estudo, para o litoral médio, as águas apresentaram altos valores de condutividade elétrica (CE) e quando plotadas no gráfico USSL (Figura 9) no geral demonstraram um risco médio a alto para salinização e sódio.

Segundo Reginato *et al.*, (2008) a maior parte da captação feita nos aquíferos confinados ou livres da região costeira é feita através de poços denominados como “artesianos” ou “semi-artesianos”, os quais não atendem às especificações técnicas previstas. Assim, estes poços muitas vezes do tipo ponteira e cacimba apresentam maior vulnerabilidade e, portanto, maior risco a contaminações principalmente pela atividade antrópica.

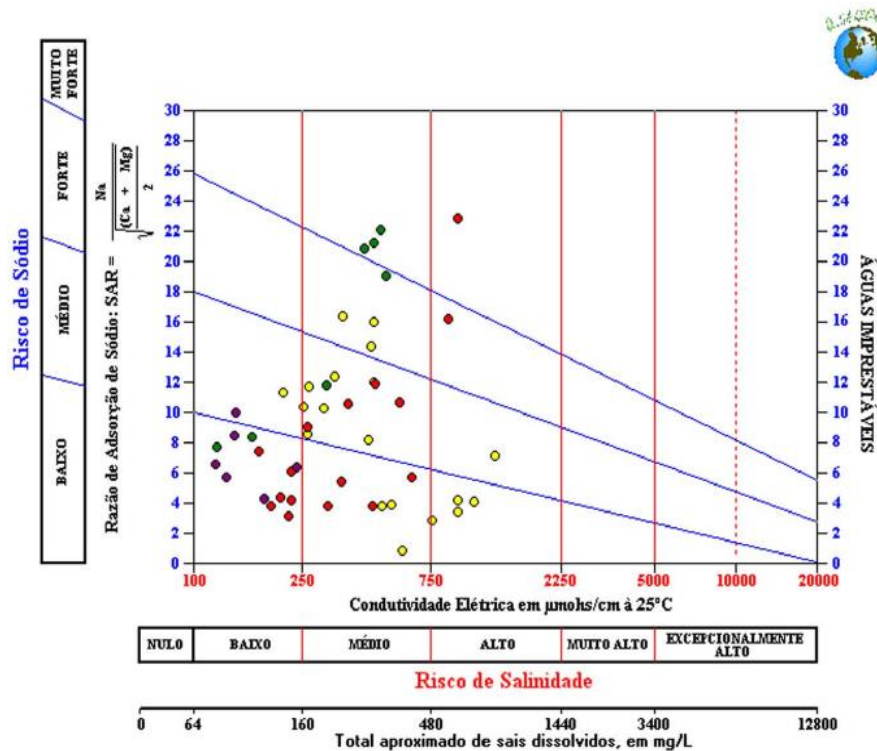


Figura 9. Gráfico USSL indicando o risco à salinização e ao sódio para irrigação (adaptado de Reginato et al., 2009).

Além do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), a presença de microrganismos pode indicar contaminação antrópica nos aquíferos (SALGUEIRO, 1981), sendo a *Escherichia coli* um bom indicador para contaminação fecal como apontado no estudo de Paim et al., (2018), que também indicou locais com alto potencial para contaminação como cemitérios, áreas agrícolas e urbanas.

### 2.3.3 Avaliação da Ocorrência de Cloretos nas Águas Subterrâneas

Em sua forma iônica, o cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) é um ânion extremamente abundante em águas subsuperficiais por ser um íon muito conservativo, ou seja, não tem sua migração afetada pela interação com sedimentos, rochas ou com o solo. A maior fonte de cloretos na crosta é proveniente do mineral halita ( $\text{NaCl}$ ), assim como silvita ( $\text{KCl}$ ) e cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), mas em quantidades insignificantes. São geralmente formados em depósitos de evaporitos pela intensa evaporação da água do mar durante o tempo geológico (KELLY & HACKLEY, 2012).

Ainda, de acordo com Kelly & Hackley (2012), grande parte dos cloretos reciclados pelos reservatórios na Terra são devido a atividades antropogênicas. Grande parte das práticas têm origem a partir de resíduos da pecuária, além de fertilizantes sintéticos (principalmente  $\text{KCl}$ ), esgotos, entre outras atividades industriais, agrícolas

ou urbanas. Além disso, quando infiltrados até o aquífero, os cloretos podem permanecer por décadas já que o cloreto pode ser considerado um íon persistente (HOWARD *et al.*, 1993).

Pode-se destacar a presença de cloretos em aquíferos costeiros, já que, pela proximidade com o oceano, é possível que intrusões de águas marinhas ocorram, aumentando assim a concentração de cloretos e salinidade. A razão Cl/Br é um bom indicador para origem dos cloretos nas águas subterrâneas, já que são íons muito comuns tanto nos aquíferos quanto águas marinhas, além de terem um comportamento conservativo, um pequeno raio iônico e também apresentarem um caráter hidrofílico (DAVIS & WHITTEMORE, 1998).

Além disso, a razão Cl/Br pode ser aplicada em diversos aspectos, como inicialmente a qualidade da água (NAILY, 2018), como um traçador para identificar a origem das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas (FREEMAN, 2007), como uma importante ferramenta no entendimento da hidrogeologia das águas com salinidades baixas a moderadas, além de ser um importante método para identificar a origem da contaminação a partir de fontes como fossas sépticas, resíduos agrícolas e lixiviação (DAVIS & WHITTEMORE, 1998).

O princípio básico para o uso da razão Cl/Br, segundo Alcalá & Custódio (2008), está na determinação inicial da razão Cl/Br para deposição atmosférica, e assim, posteriormente é viável estabelecer as contribuições naturais de Cl e Br a partir do aquífero e também possíveis fontes de contaminação antrópicas.

O principal método analítico para determinação da razão Cl/Br é a divisão da concentração de cloreto pela concentração de brometo, tanto pela concentração molar (*r*) quanto pela massa (*p*), expressa pela equação (DAVIS & WHITTEMORE, 1998; ALCALÁ & CUSTÓDIO, 2008; KATZ *et al.*, 2011; NAIR *et al.*, 2013):

$$R = \frac{rCl}{rBr} = 2.25 \frac{pCl}{pBr}$$

Os resultados obtidos a partir da equação acima são importantes para o entendimento da qualidade da água, a partir de diversas interpretações de acordo com Alcalá & Custódio (2008), como representado na figura (10).

Níveis altos de cloretos em águas subterrâneas afetam os índices de potabilidade do aquífero. Por isso, o Ministério da Saúde, por meio da portaria N° 888 de 4 de maio de 2021 tem como o limite máximo ou Valor Máximo Permitido (VMP) de cloreto 250 mg/L para o consumo humano. O consumo de águas com teores acima destes previstos, podem ser danosos à saúde.

De acordo com da Silva *et al.*, (2013) os cloretos em excesso podem causar problemas neurológicos, já que é um íon importante em ações dos receptores nervosos pois há entrada de Cl<sup>-</sup> em alguns neurônios. Além disso, é importante para troca

cloreto-bicarbonato para algumas proteínas, permitindo guardar CO<sub>2</sub> na forma HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> na corrente sanguínea (APHA, 1995).

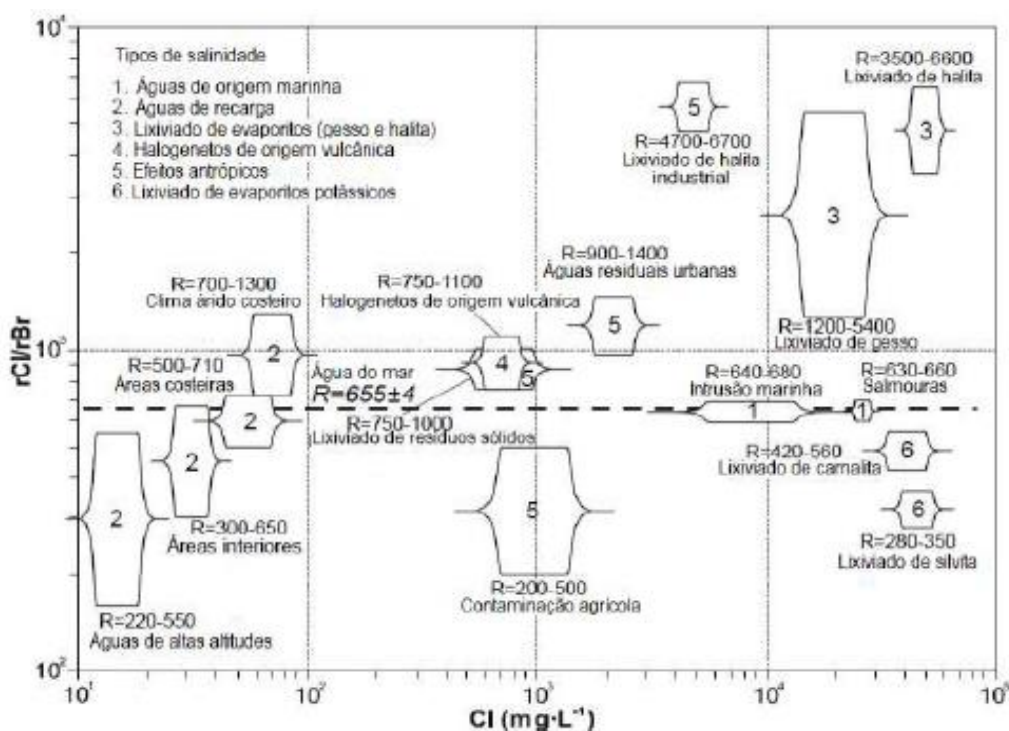


Figura 10. Gráfico com a razão molar entre Cl/Br versus a concentração de cloretos para seis tipos de salinidade em aquíferos da Espanha e Portugal (modificado de Alcalá & Custódio, 2004; Tradução de Sanches, 2016).

Além de problemas de saúde, segundo Costa Filho *et al.*, (1998), altas concentrações de cloreto podem gerar problemas quando utilizadas águas com estas características para irrigação, já que diversas culturas podem não tolerar estas quantias, assim como para algumas plantações concentrações não muito elevadas já podem ser consideradas tóxicas.

### 3 METODOLOGIA

Para elaboração do trabalho foram executadas as seguintes etapas de acordo com os itens a seguir:

#### 3.1 Levantamento de Dados Existentes

A primeira etapa do projeto contou com a coleta de informações já existentes em relação ao tema do projeto, o que forneceu um panorama para área de estudo.

Com isso, o levantamento de dados disponíveis em artigos, teses, dissertações e outros projetos de pesquisa foram levados em conta nessa etapa. Além disso, a

coleta de dados de poços junto a Companhia Riograndense de Saneamento (COR-SAN), o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS – CPRM) e o Sistema de Outorga de Água do Rio Grande do Sul (SIOUT – DRH/SEMA) também foi realizada nesta etapa do projeto.

### **3.2 Levantamento de Campo**

Nos dias 6, 7, 8 e 9 de junho de 2022 o levantamento de campo foi realizado no município de Terra de Areia a fim de coletar novos dados para o então projeto, tanto relacionado ao cadastramento de poços quanto aspectos da geologia local.

Inicialmente, foi realizada uma análise dos poços que são utilizados no abastecimento público do município e que são propriedade da CORSAN. Especificamente para o poço COR TAR 12, o Geólogo Maiquel Kochhann Lunkes da CORSAN realizou a filmagem do poço com o uso da câmera LAVAL R-CAM 1000 (Figura 11), o qual permitiu analisar os contatos entre as litologias, assim como entradas d'água presentes ao longo do poço. Nesse poço foi realizado o levantamento de um perfil hidroquímico vertical, onde foi feito o levantamento das variações de CE e temperatura com a profundidade. Para isso foi utilizado um medidor de níveis manual da SOLINST, com sonda de CE e sensor de temperatura acoplados.



*Figura 11. Imageamento do poço COR TAR 12 com o uso da câmera LAVAL R-CAM 1000.*

Nos demais dias, foi realizado o cadastramento de poços com o auxílio de técnicos da Vigilância Sanitária do Município, onde novos poços não listados em bancos de dados como o SIAGAS e SIOUT foram identificados. Os dados coletados consistiram de informações sobre o tipo de poço, aspectos construtivos, níveis de água e medição de parâmetros físico-químicos. Durante o cadastramento de poços ponteiros e escavados, para coleta de dados hidroquímicos foi utilizado a sonda multiparâmetro KkCare (Figura 12), permitindo assim a aquisição de dados como a temperatura, pH, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos. As demais informações, como a profundidade dos poços, foram obtidas através dos proprietários dos poços. Para uma análise mais abrangente, foram coletadas 6 amostras de água armazenadas em frascos, com acondicionamento em isopor e gelo, para que se mantivessem refrigeradas o que possibilita a medição dos parâmetros químicos presentes na água sem interferências. Posteriormente, foram transportados no mesmo dia até o Laboratório de Análise de Águas do Centro de Ecologia da UFRGS, assim como no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH – UFRGS). Através das amostras de água, utilizando um fotômetro PALINTEST 8000 presente no IPH, foram obtidos parâmetros como F<sup>-</sup>, Fe, Mn, Cr6<sup>+</sup>,



Cobre livre e dureza, já os parâmetros cloretos e nitrato, foram analisados pelo Laboratório de Análise de Águas do Centro de Ecologia da UFRGS, através dos métodos de volumetria de precipitação e espectrofotometria UV, respectivamente (Standard Methods 21ST).



*Figura 12. Análise de água utilizando a sonda multiparâmetros modelo KkCare.*

Durante o trabalho também foram feitas descrições de campo quanto a afloramentos rochosos da Fm. Serra Geral e também pontos onde sedimentos inconsolidados pertencentes aos sistemas laguna-barreira, afloram. Para descrição dos sedimentos foram feitas perfurações em pontos distintos com o auxílio de um trado manual de 2 metros, além de uma pá onde foram escavadas trincheiras para melhor observação da transição de diferentes camadas.

### **3.3 Elaboração do Banco de Dados**

Inicialmente, o levantamento dos dados foi feito através da aquisição de dados por meio da Secretaria de Habitação e Saneamento (SEHABS), assim como dados da rede RIMAS (SIAGAS - CPRM) e também dados do SIAGAS (CPRM).

Somadas aos dados iniciais, posteriormente as informações obtidas em campo também foram atreladas, constituindo um banco de dados hidrogeológico, hidroquímico, além de outras informações relevantes referentes aos poços. Para isso, os dados foram organizados em planilhas através do software Microsoft Excel (Tabela 1).

Tabela 1. Exemplo de planilha utilizada no projeto para dados iniciais.

Código	UTM N	UTM E	Aquífero	Prof. (m)	Diâmetro (poço)	Entrada(s) de Água (m)	NE (m)	Vazão (m3/h)	Capacidade Específica (m3/h/m)
COR TAR 01	6727021	590041	SASG/SAG	160	0,00 - 29,57m = 10" 29,57 - 160m = 8"	1,70 (Areia fina) 49,50 (Brecha basáltica)	20,73	6	0,083
COR TAR 02	6726682	590286	SASG/SAG	226	0,00 - 26,35m = 10" 26,35 - 226m = 8"	2,00 (Areia fina argilosa) 75,00 (Brecha basáltica) 185 (Basalto e tufo)	11,72	17	0,125
COR TAR 02A	6726680	590280	SASG/SAG	228	0,00 - 0,6m = 22" 0,6 - 24m = 15" 24 - 40m = 10" 40 - 228 = 8"	-	-	7,92	-
COR TAR 03	6726311	590204	SASG/SAG	232	0,00 - 33,5m = 10" 33,5 - 34m = 9,5" 34 - 35m = 9" 35 - 36m = 8,5" 36 - 232m = 8"	13,40 (Areia fina a média) 26,00 (Areia silto-argilosa) 44,00 (Basalto amigdalóide fraturado) 64,00 (Basalto albitizado) 84,00 (Basalto amigdalóide muito fraturado)	17,18	15,5	0,228

O banco de dados inclui informações da natureza do ponto de captação, como coordenadas, localização, cota do terreno, assim como dados construtivos do poço, incluindo diâmetro, profundidade, pré-filtros e entradas de água e revestimento do poço. Além disso, os dados hidroquímicos e hidrogeológicos podem ser listados como parâmetros de vazão, capacidade específica, nível estático e dinâmico, perfis geológicos, assim como a condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade.

### 3.4 Caracterização Geológica

A geologia da área foi analisada através dos poços cadastrados no inventário do projeto, a partir da correlação de camadas correlatas presentes nos perfis geológicos e então analisadas pelo tipo de sedimento e suas similaridades ao longo da área de estudo. Além disso, foi trabalhada a partir do Mapa Geológico do Rio Grande do Sul 1:750.000 (CPRM, 2008) e com auxílio do mapa geológico costeiro do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) escala 1:250.000, assim como trabalhos realizados próximos à área de estudo.

Também, a partir do trabalho de campo destinado ao projeto citado no item 3.2, a geologia foi caracterizada com o auxílio das descrições de campo em pontos distintos ao longo da área de estudo, com o uso de um trado manual e também a abertura

de trincheiras (Figura 13), que possibilitaram correlacionar camadas de sedimentos inconsolidados a partir das características similares das mesmas, principalmente associado à cor, variação granulométrica, forma dos grãos, entre outros parâmetros.



*Figura 13. Perfuração realizada em sedimentos inconsolidados de paleobarreira com auxílio de trado manual.*

### **3.5 Caracterização Hidrogeológica**

A partir dos dados presentes no inventário, tanto coletados em campo quanto previamente considerando os trabalhos de Machado & Freitas (2005) e Troian et al., (2020), foi possível realizar uma análise geral da hidrogeologia do município.

Assim, para caracterização hidrogeológica, fez-se necessário a utilização do banco de dados com a utilização de parâmetros hidrodinâmicos como vazão, capaci-

dade específica, transmissividade, entre outros critérios, como também dados construtivos, se utilizando de cálculos estatísticos como média, mediana e desvio padrão presentes nas ferramentas do software Microsoft Excel.

Para identificação dos aquíferos, além da utilização das ferramentas estatísticas, foi importante a utilização de informações presentes nos perfis construtivos dos poços majoritariamente obtidos através do SIAGAS, indicando as características das camadas aquíferas, como a sua continuidade, litologia, espessura entre outros dados, como a definição da geologia regional a partir do item 3.4.

### **3.6 Caracterização Hidroquímica e da Qualidade da Água**

A análise hidroquímica teve como base dados obtidos através da CORSAN, SIAGAS e RIMAS, além de dados obtidos em campo que posteriormente foram feitas análises em laboratório.

Assim, durante a etapa de levantamento de campo foram feitas coletas de água em poços cadastrados posteriormente no banco de dados, com análises de parâmetros pH, CE, STD, com o uso de sonda multiparâmetros KkCare.

A partir das informações obtidas, foi feita a avaliação dos principais cátions e ânions que compõem as águas subterrâneas. Assim, com os dados em posse, foram definidas classes de águas para os aquíferos com o auxílio do software Qualigraf, o que permitiu a elaboração de gráficos Piper e Stiff. Além disso, foi feita a análise estatística dos íons presentes com a geração de gráficos, que foram elaborados por meio do software Microsoft Excel.

A qualidade da água por sua vez foi avaliada através da comparação dos parâmetros observados com os parâmetros definidos pela portaria GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (BRASIL, 2021).

### **3.7 Análise da Ocorrência de Cloretos**

Mais especificamente, para ocorrência de cloretos, foi feita uma avaliação dos relatórios previamente obtidos que continham análises físico-químicas os quais apresentem dados de concentração de cloretos.

A avaliação da ocorrência e da origem de cloretos foi feita com base na análise estatística (valores máximos, mínimos, média, mediana e desvio padrão de dados de concentração de cloretos, visando com isso identificar as anomalias de concentrações. Os poços que apresentaram concentrações elevadas de cloretos foram plotados no mapa geológico, visando avaliar se havia correlação entre os diferentes tipos de sedimentos e seus ambientes de sedimentação com as anomalias. Também foram avaliados os perfis geológicos e construtivos dos poços com o objetivo de identificar prováveis relações entre as anomalias e os dados geológicos e construtivos.

Também foi realizado um perfil vertical de CE e T°C no poço COR TAR 12 (descrito no item 3.2 de levantamento de campo) que é um dos poços que apresenta anomalias de cloretos.

Além disso, foram feitas análises a partir de razões iônicas como Cl<sup>-</sup>/Br<sup>-</sup> com base nos estudos prévios de Alcalá & Custódio (2004) para os poços RIMAS que captam águas do SAC. Também foram analisadas razões de cloreto e bicarbonato (Cl<sup>-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e sódio e cloreto (Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>) para todos os poços do SAC e poços do SAG com influência do SAC com anomalias de cloretos presentes, a fim de observar a origem da salinidade presente nas águas e também os cloretos.

Essas análises, associada a localização do poço, bem como da camada aquífera que estava sendo captada pelo poço, permitiu avaliar as áreas de ocorrência de anomalias de concentração de cloretos, bem como identificar os prováveis fatores responsáveis pela ocorrência de concentração elevado de cloretos.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Caracterização Geológica**

No município de Terra de Areia apenas uma das unidades aflora relacionada à Bacia do Paraná, mais especificamente a Fm. Serra Geral, mais a noroeste do município, porém na porção confinada, abaixo dos derrames basálticos, encontra-se a Fm. Botucatu que se estende, possivelmente, ao longo de toda região. Além disso, a maior parte do município é recoberta pelos sedimentos cenozóicos da planície costeira como se observa no mapa abaixo (Figura 14). O estudo da geologia da planície costeira presente ao longo da área de estudo foi feito com base no levantamento realizado pela CPRM (2008), e também através do estudo elaborado por Tomazelli & Villwock (2000).

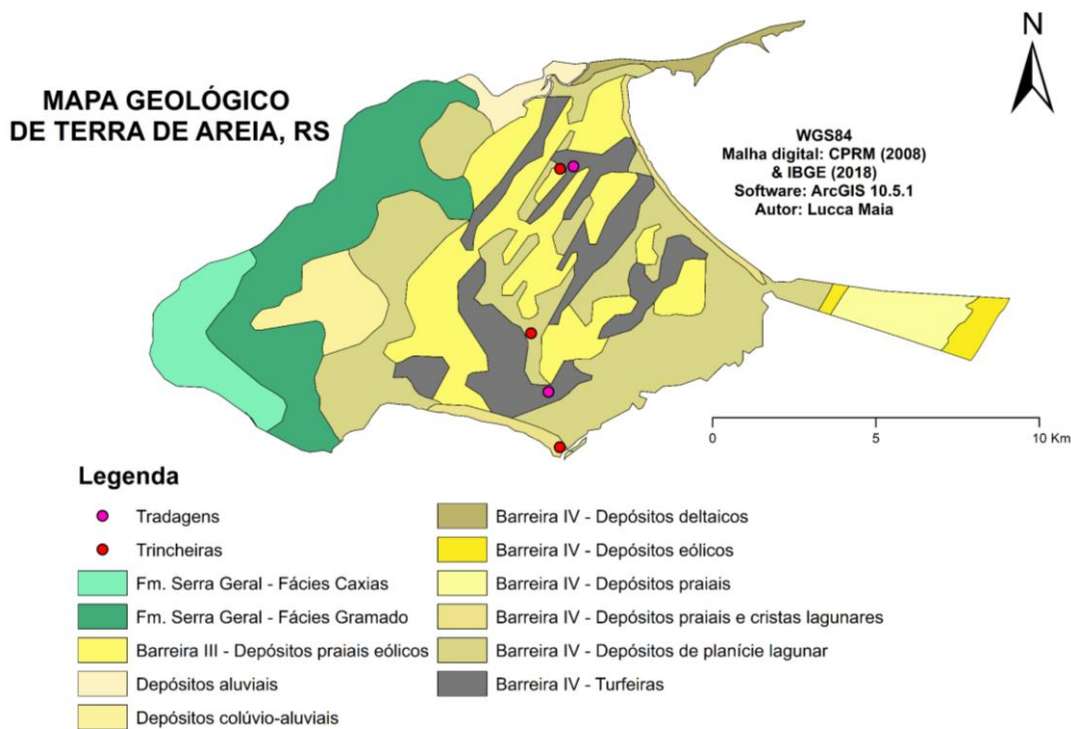


Figura 14. Mapa geológico do município elaborado a partir de dados da CPRM (2008) e dados obtidos em campo.

#### 4.1.1 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral apresenta locais aflorantes ao longo da porção de escarpa da mesma, situada em grande parte na região oeste de Terra de Areia. De acordo com o mapa elaborado pela CPRM (2008), os afloramentos mais a oeste constituem a Fácies Caxias que apresenta derrames de composição intermediária à ácida, com riolitos a riodacitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos e textura esferulítica do tipo carijó. O topo dos derrames apresenta forte brechação, já na porção central, apresenta estruturas de fluxo e deformação, além de auto brechas frequentes, as vesículas apresentam preenchimento predominantemente por calcedônia e ágata. Quanto à Fácies Gramado, esta interceptada por alguns poços TAR, apresenta derrames basálticos granulares finos a médio, melanocráticos cinza, com horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita. Apresenta estruturas de fluxo e *pahoehoe* comuns, além de intercalações com arenitos Botucatu, observadas em alguns poços do município.

Foi feita uma análise em um dos afloramentos próximos à área de estudo assim permitindo a melhor identificação referente às características gerais litológicas e estruturais. O ponto observado (Figura 15) apresenta um conjunto de derrames de lava basáltica, com aproximadamente 5 m de altura e 15 de comprimento, com basalto amigdalóide, com estruturas de fluxo presentes, além de zonas muito fraturadas como pode-se observar a seguir onde os derrames foram individualizados.



*Figura 15. Derrames de lava basáltica em área de empréstimo, detalhe para os derrames individualizados em vermelho.*

Os basaltos também foram observados a partir do imageamento dos poços TAR - 12 e TAR - 13 pelo geólogo Maiquel Lunkes da CORSAN, onde foi possível observar com maior detalhe algumas feições presentes na rocha. Foi viável a separação em algumas zonas conforme estas feições, já que foram observadas porções com maior presença de vesículas e amígdalas (Figura 16), além de zonas com veios e fraturas (Figura 17), além do contato basal entre o basalto e o arenito Botucatu (Figura 18). Logo, estas características apontam para à Fácies Gramado, conforme descrito no parágrafo inicial.



Figura 16. Zona de vesículas e amígdalas em basalto acinzentado, correspondendo a provável porção central do derrame, além de pequenos veios também presentes no poço TAR-12.



Figura 17. Zona onde predominam fraturas e veios, além de pequenas vesículas à esquerda, também no poço TAR-12.





Figura 18. Zona de contato no poço TAR-12 entre o basalto e o arenito, à esquerda detalhe para as amígdalas onde há transição para o arenito, até a entrada d'água observada à direita onde ocorre o contato, ocorrendo precipitação de prováveis carbonatos.

#### 4.1.2 Formação Botucatu

A formação Botucatu não apresenta afloramentos ao longo do município de Terra de Areia, apesar disso, trabalhos anteriores como os de Machado (2005) apontam sua distribuição ao longo de toda região, além de que é captado pela grande maioria dos poços presentes no município. No geral são arenitos finos a médios, quartzo-feldspáticos, com tons róseos-avermelhados e subordinadamente amarelados, bem selecionados, com grãos arredondados e de alta esfericidade (MACHADO, 2005). Como estruturas primárias, geralmente apresenta laminação plano-paralela, sendo mais difícil observar outras estruturas de grande porte em testemunhos obtidos a partir de poços tubulares profundos.

A partir de dados de poços e descrição de amostras de testemunhos, se observa em grande parte a presença de arenitos finos a grossos (os últimos menos recorrentes) friáveis, de coloração rosa-avermelhada e em alguns casos apresentando uma porção síltico-argilosa em seu arcabouço e, mais raramente, alguns minerais máficos. Quanto às estruturas, é possível observar arenitos *intertrapps* (areias eólicas presentes entre rochas basálticas, trapeados entre os derrames de lava), tanto na filmagem realizada no poço TAR-12 (Figura 20) quanto pelos testemunhos presentes nos poços TAR-06, TAR-05 e TAR-04A (Figuras 21 e 22). Somados aos *intertrapps*, também se observou entradas d'água ao longo do poço TAR-12 com o contato entre as duas litologias (Figura 19).

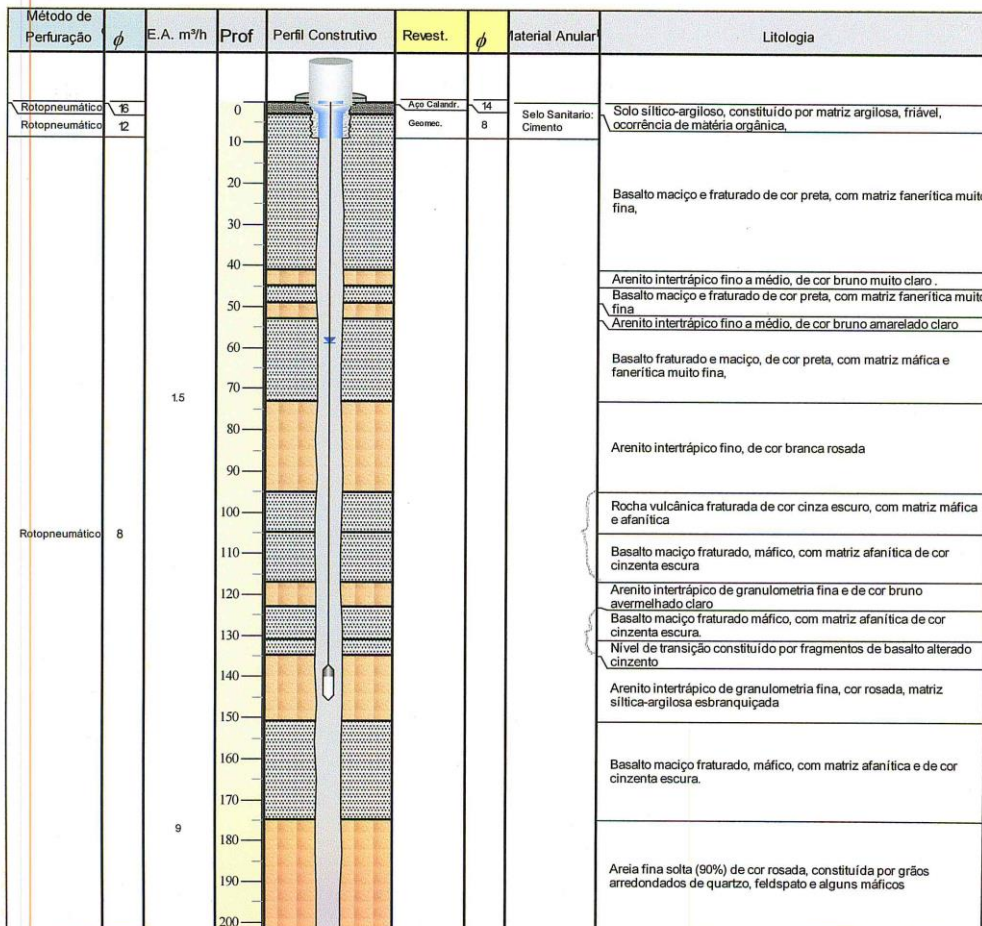


Figura 19. Detalhe para interface basalto-arenito, do poço TAR-12, onde o arenito intertrápico (porção superior) transiciona para o basalto amigdalóide com entrada d'água presente.



Figura 20. Detalhe para interface basalto-arenito, do poço TAR-12, onde o arenito intertrápico (porção superior) transiciona para o basalto, sendo aqui sua porção basal.

<b>Município</b>	TERRA DE AREIA	<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Coordenadas Geográficas</b>
<b>Localidade</b>	SEDE	589534 6727033	-50° 4' 32.0" -29° 34' 59.8"
<b>Endereço</b>	Rua José Guimarães, 4587	<b>Z</b>	27 m
<b>Regional</b>	SURLIT	<b>Z + rev.</b>	27.8 m
<b>Bacia</b>	Tramandaí	<b>Fuso</b>	22 J
<b>Perfurador</b>		<b>Merid.Centr</b>	51
<b>Proprietário</b>	CORSAN	<b>Início</b>	07/04/1998
<b>Aquífero</b>	Sist. Aquíf. Costeiro II	<b>Fim</b>	08/04/1998
		<b>Folha</b>	SH.22-X-C-V-2
		<b>Carta</b>	Maquiné
		<b>CREA CORSAN N°</b>	<b>17865</b>
		<b>ART Obra n°</b>	<b>5258058</b>

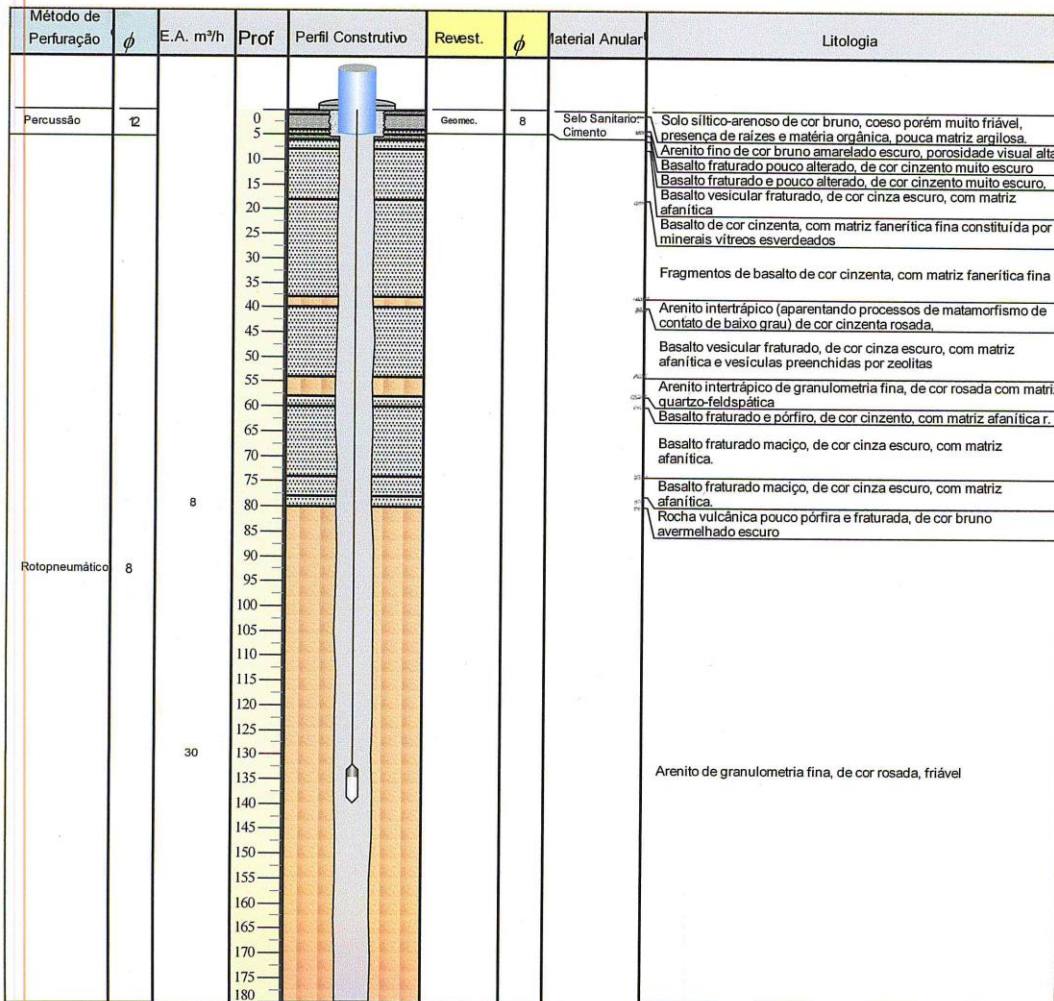


**Dados Operacionais**

<b>Vazão (m³/h)</b>	<b>Vazão (m³/dia)</b>	<b>Nível Estático (m)</b>	<b>Nível Dinâmico (m)</b>	<b>Prof. Bomba (m)</b>	<b>Tempo Máx. Bombeamento (h)</b>
10	140	58.96	136	146	14
<b>Profundidade Total</b>	<b>202 m</b>	<b>Situação</b> <i>Operação Contínua</i>		<b>29/04/1998</b>	
<b>Profundidade Útil</b>	<b>202 m</b>	<b>Serviço</b>		<b>Márcio André Klein</b>	
<b>Capacidade Específica</b>	<b>0.13 m³/h/m</b>	<b>Licença</b>		<b>81585</b>	
<b>Restrição</b>					

Figura 21. Perfil geológico esquemático elaborado pela CORSAN do poço TAR-06 com a presença de arenitos intertrapps.

<b>Município</b>	TERRA DE AREIA	<b>Coordenadas UTM</b>	<b>Coordenadas Geográficas</b>
<b>Localidade</b>	SEDE	589879 6726841	-50° 4' 19,1" -29° 35' 5,9"
<b>Endereço</b>	Rua Osvaldo Aranha, 6329	<b>Z</b>	15 m
<b>Regional</b>	SURLIT	<b>Z + rev.</b>	15,35 m
<b>Bacia</b>	Tramandaí	<b>Fuso</b>	22 J
<b>Perfurador</b>	CORSAN	<b>Merid.Centr</b>	51
<b>Proprietário</b>	CORSAN	<b>Início</b>	22/11/1990
<b>Aquífero</b>	Sist. Aquíf. Costeiro II	<b>Fim</b>	06/12/1990
		<b>Folha</b>	SH.22-X-C-V-2
		<b>Carta</b>	Maquiné
		<b>CREA CORSAN N°</b>	<b>17865</b>
		<b>ART Obra n°</b>	<b>5258058</b>



**Dados Operacionais**

Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Prof. Bomba (m)	Tempo Máx. Bombeamento (h)
10	120	37	90	140	12
Profundidade Total	180 m	Situação	Operação Contínua		
Profundidade Útil	180 m	Serviço			
Capacidade Específica	0.248 m³/h/m	Licença			
Restrição					

21/06/1991  
 Márcio André Klein  
 81585

Figura 22. Perfil geológico esquemático elaborado pela CORSAN do poço TAR-05 também com a ocorrência de arenitos intertrapps.

### 4.1.3 Sistema Laguna-Barreira III

No geral a Barreira III apresenta depósitos arenosos, com areias finas, por vezes siltico-argilosas, moderadamente selecionadas, com grãos de alta esfericidade e bem arredondados, além também de porções ferruginosas e carbonáticas (TOMAZELLI & VILLWOCK, 2000).

Conforme analisado no trabalho de campo, através da abertura de trincheira e escavação através de trado manual, uma pequena amostragem pode ser realizada em uma possível paleoduna eólica presente em afloramento da barreira III. A partir da abertura de uma trincheira de 1,1 m de profundidade e outra a trado até 2 m de profundidade (Figura 23) foi possível observar uma gradação de areia de coloração branca-creme, fina, bem selecionada, com alta esfericidade, quartzosa para uma areia siltosa-argilosa, amarelo-alaranjada, mal-selecionada, com fração arenosa apresentando média a alta esfericidade e grãos bem arredondados, possivelmente com certo teor de oxidação, não foram observadas estruturas ou icnofósseis. O perfil construtivo/geológico do poço TAR 11 também evidencia a gradação de areias argilosas de coloração amarelada-bege para areias brancas, como apresentado na figura (24).



*Figura 23. À esquerda trincheira escavada em paleoduna onde é possível observar o nível de solo amarronzado, gradando para areias de coloração amarelo-alaranjada e posteriormente de coloração branca-creme onde também foi coletada pela extração a trado à direita.*

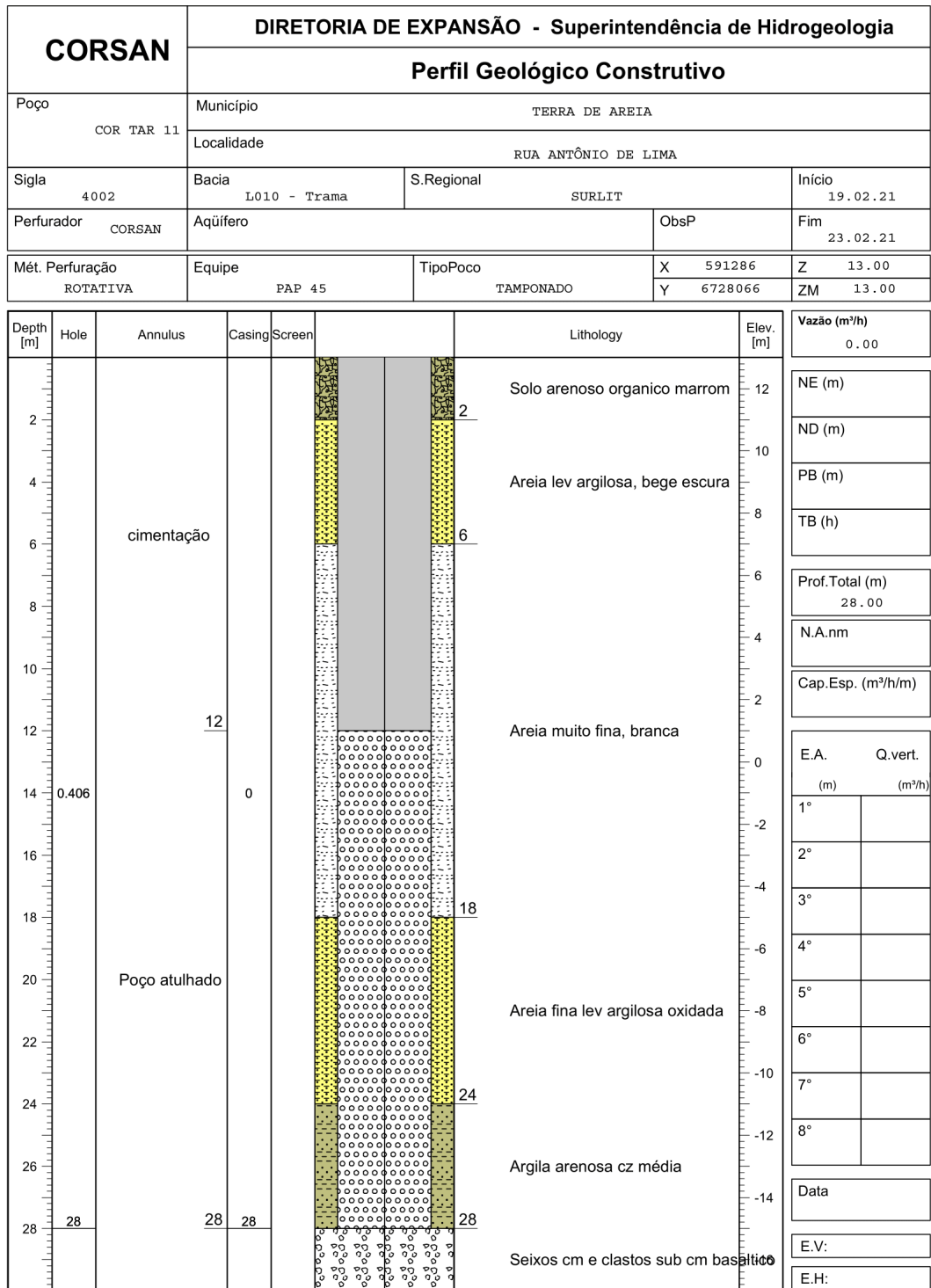


Figura 24. Perfil geológico/construtivo do poço TAR 11 onde evidencia a transição dos dois depósitos provavelmente de origens distintas.

#### **4.1.4 Sistema Laguna-Barreira IV**

Os depósitos da laguna-barreira IV holocênicos para região de Terra de Areia consistem na colmatação de corpos lagunares que estiveram presentes entre os cordões litorâneos pleistocênicos da Barreira III, com o máximo transgressivo holocênico as regiões entre os cordões foram afogadas e posteriormente no período regressivo, estes espaços foram tomados pela vegetação e sedimentação que possibilitaram a formação de turfeiras e depósitos de areias siltosas-argilosas, conforme evidenciado por Tomazelli & Villwock (1991). Este pode ser considerado como um ambiente paludial, onde pequenos corpos lagunares foram gradativamente sendo recobertos por sedimentos terrígenos e progressivamente por restos vegetais com o rebaixamento do nível de base que acompanhou o evento regressivo. No geral, conforme descrito por Tomazelli & Villwock (1991), o pacote de sedimentos lagunares apresenta uma granodecrescência em direção ao topo, iniciando em sua base com areias médias a finas, no intervalo médio composto por areias finas com fração argilosa-siltosa, e seu topo com uma coloração preta rica em matéria orgânica como troncos e raízes.

O trabalho realizado em campo permitiu a análise de alguns pontos onde foram observados afloramentos de sedimentos inconsolidados para o sistema lagunar e praias com cristas lagunares holocênicos. A partir da realização de uma tradagem (Figura 25), foi feita a descrição de uma pequena amostra de sedimentos inconsolidados os quais apresentaram uma fração de argila arenosa de coloração acinzentada, rico em matéria orgânica indistinguível. Foi também realizada a descrição de outra amostra a partir da abertura de trincheira (Figura 26) na qual apresenta uma fração arenosa muito fina de coloração branca-bege com média esfericidade, grãos subangulosos, quartzosa. A trincheira observada na figura (26) foi escavada em um dos depósitos praias de cordões lagunares holocênicos também presentes na região.



*Figura 25. Escavação por meio de trado manual em depressão topográfica, correspondente aos depósitos de turfeira.*



*Figura 26. Abertura de trincheira de 30x48 cm onde é possível observar o nível freático em sua base.*

## **4.2 Caracterização Hidrogeológica**

O município de Terra de Areia abrange três Sistemas Aquíferos: Serra Geral (SASG), Guarani (SAG) e Costeiro (SAC) (Figura 27). Em geral os poços que estão localizados na área de ocorrência do SASG, interceptam as rochas sedimentares,



captando água do SAG também. Assim, não foi possível fazer uma caracterização do SASG, por isso nesse trabalho estão sendo descritos dois sistemas.

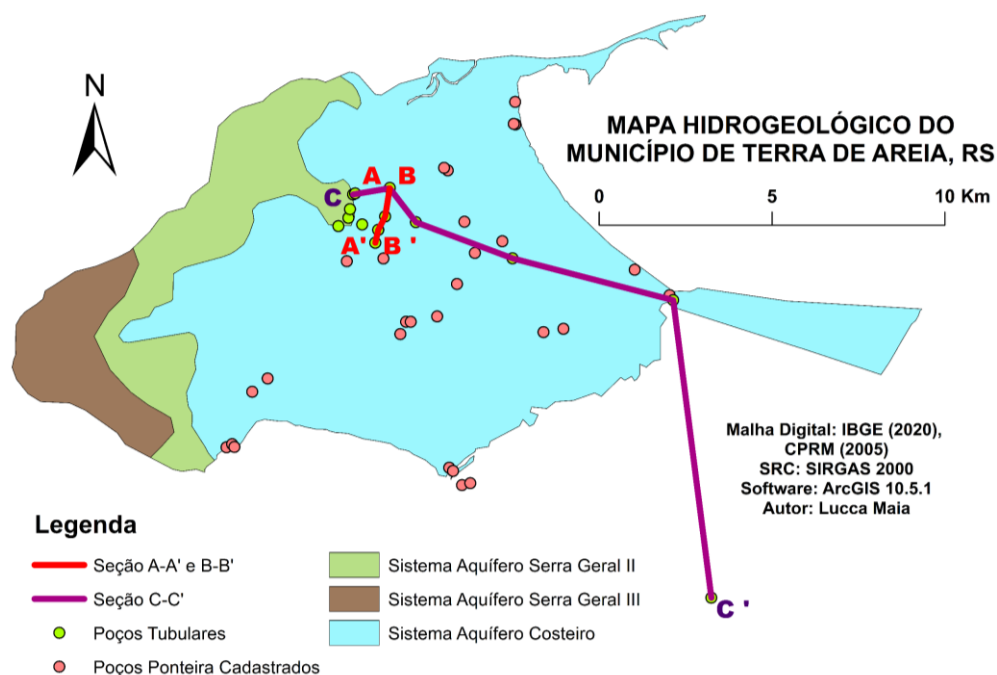


Figura 27. Mapa hidrogeológico elaborado a partir de dados da CPRM (2006) com dados levantados pelo autor.

#### 4.2.1 Sistema Aquífero Guarani

A partir do banco de dados levantado pelo autor, foram identificados ao todo 14 poços tubulares perfurados pela CORSAN que captam águas do SAG. Alguns desses poços também apresentam entradas d'água em litologia basáltica, porém no geral os poços captam águas em aquíferos porosos, confinados. A partir destes dados, foi possível fazer a análise da camada aquífera, com poços que demonstram uma espessura que varia de 24 a 253 m, os quais apresentam arenitos finos a grossos, por vezes com fração silítico-argilosa. Como apresentado no mapa acima (Figura 27), os poços que captam neste aquífero estão localizados na porção centro-norte do município, com uma proximidade maior em relação aos afloramentos da Fm. Serra Geral.

Para melhor compreensão do aquífero como um todo, foram feitas análises estatísticas a partir dos dados dos poços quanto à vazão, capacidade específica, profundidade e nível estático. Além disso, foi feita uma seção a partir dos perfis geológicos dos poços para análise quanto à variação longitudinal das camadas, como será demonstrado a seguir.

A vazão apresentou uma variabilidade alta dada a heterogeneidade que se observa no aquífero. A maior parte dos poços apresenta uma vazão média, com mais de

50% apresentando valores acima de 10 m<sup>3</sup>/h, o que indica uma produtividade baixa a moderada para este aquífero na região. A tabela (Tabela 2) a seguir representa a variabilidade presente no aquífero.

*Tabela 2. Dados estatísticos para a vazão no Sistema Aquífero Guarani.*

<i>Vazão (m<sup>3</sup>/h) (SAG)</i>	
Média	14,04
Mediana	14,50
Desvio Padrão	6,66
Mínimo	6,00
Máximo	30,00

Quanto à capacidade específica, apresenta valores um pouco abaixo do esperado para o SAG, porém sem muitas variabilidades ou anomalias como é evidenciado pela tabela abaixo (Tabela 3). No geral, apenas 4 poços apresentam capacidades específicas acima de 0,2 m<sup>3</sup>/h/m, visto que estes valores se encontram abaixo da estimativa apontada por Machado & Freitas (2005), com valores entre 0,5 e 2 m<sup>3</sup>/h/m.

*Tabela 3. Dados estatísticos para a capacidade específica no SAG.*

<i>Capacidade Específica (m<sup>3</sup>/h/m) (SAG)</i>	
Média	0,21
Mediana	0,20
Desvio Padrão	0,12
Mínimo	0,08
Máximo	0,53

Para os poços que captam o SAG na região, 50% apresentam profundidades acima de 200 m. No entanto, este parâmetro apresenta certa variabilidade conforme representado na tabela a seguir (Tabela 4). Nota-se que o poço mais raso para este aquífero atinge 96 m, enquanto que o mais profundo 253 m.

*Tabela 4. Dados estatísticos para a profundidade no SAG.*

<i>Profundidade (m) (SAG)</i>	
Média	198,95
Mediana	206,00
Desvio Padrão	43,33
Mínimo	96,22
Máximo	253,10

Por fim, o nível estático (NE) também apresenta determinada variabilidade, já que 50% dos poços apresentam um nível estático inferior a 20 m, enquanto que dentre os demais 42% apresentam um NE acima de 30m. O poço com nível estático mais próximo à superfície encontra-se a 6,5 m, enquanto que o mais profundo atinge 59 m aproximadamente conforme a tabela abaixo (Tabela 5).

Tabela 5. Dados estatísticos para o nível estático no SAG

Nível Estático (m) (SAG)	
Média	24,54
Mediana	19,25
Desvio Padrão	16,49
Mínimo	6,53
Máximo	58,96

A seção A-A' (Figuras 27 e 28) levantada a partir dos poços TAR - 03, TAR - 02A, TAR - 01 e TAR-04 (Sul-Norte), demonstra a relação das camadas e a variação presente nos contatos entre os basaltos e o arenito Botucatu, o último pertencente à unidade hidroestratigráfica Botucatu, conforme representado na figura (28) abaixo. Além disso, se observa também a variação mais complexa das camadas de sedimentos inconsolidados da planície costeira, fazendo contato com os basaltos da Fm. Serra Geral.

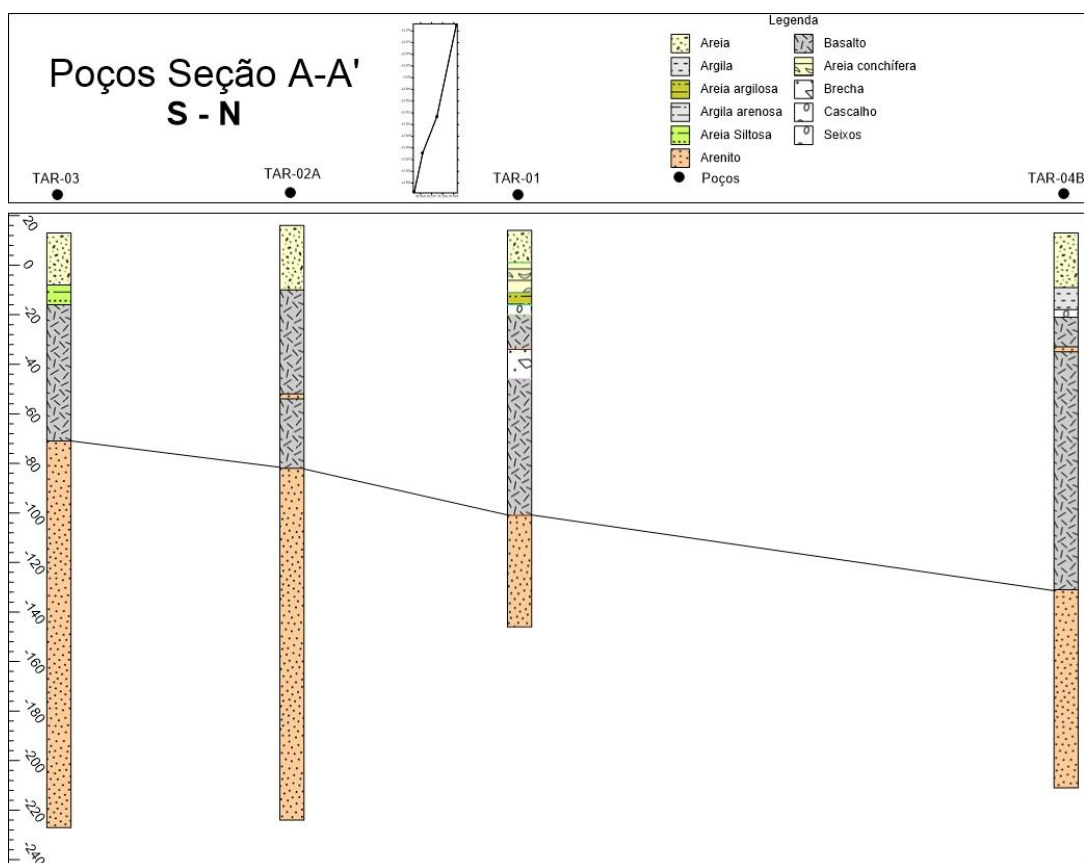


Figura 28. Seção norte-sul A-A' elaborada a partir do software Strater 5 representativa dos perfis geológicos dos poços tubulares, com as três unidades geológicas presentes.

A unidade aquífera Botucatu deve se limitar às camadas atribuídas à Fm. Botucatu, porém, como existem entradas d'água presentes ao longo dos contatos entre o basalto e arenito, além de entradas d'água em basaltos, é possível que haja misturas de águas entre os dois aquíferos. Também, nos poços TAR-02 e TAR-04B, existem camadas de arenitos intertrápicos que devem influenciar nas águas deste aquífero,

com espessuras atingindo até 2 m. Por fim, vale destacar a presença estrita de poços que captam águas apenas de camadas confinadas da Unidade Botucatu.

#### 4.2.2 Sistema Aquífero Costeiro

A partir do estudo de Troian *et al.* (2020), é possível inferir somado ao levantamento de dados para o município, que os poços do tipo ponteira captam águas muito provavelmente da unidade hidroestratigráfica 01 do Sistema Aquífero Costeiro, enquanto que a unidade 02 apenas por poços mais profundos. Segundo Troian *et al.* (2020), a unidade hidroestratigráfica 01 do SAC é composta por sedimentos inconsolidados arenosos de coloração amarelada, com características distintas em sua porção de topo e basal. No topo, são encontradas areias de granulometria fina a média, com grãos bem selecionados e baixo grau de compactação. Já na base, são encontrados sedimentos argilosos como lentes descontínuas e de espessuras variáveis. Estes depósitos estão associados aos sistemas laguna-barreira III e IV, com espessuras que variam de 15 a 30 m, fazendo contato com a Bacia do Paraná em sua porção basal. Quanto a unidade hidroestratigráfica 02, esta apresenta pacotes extensos argilosos de coloração cinza com presença de lentes de camadas de areias finas a muito finas podendo atingir até 45 m em sua porção leste, enquanto que a oeste diminui gradativamente. Estas camadas podem apresentar fragmentos de conchas provavelmente associados a depósitos marinhos.

Ao todo foram cadastrados 26 poços ao longo da área de estudo, incluindo um poço cacimba e 25 poços ponteira, além dos poços tubulares da rede RIMAS JP817 e JP818. Ao analisar os dados obtidos, o mais profundo atinge 67 m, enquanto que o mais raso atinge 7 m, como a tabela a seguir representa (Tabela 6).

Tabela 6. Profundidade para os poços ponteira e de pequeno diâmetro para o SAC.

<i>Profundidade (m) (SAC)</i>	
Média	21,55
Mediana	18,00
Desvio Padrão	14,39
Mínimo	7,00
Máximo	67,00

A partir do cadastramento também foi possível obter alguns dados referentes à litologia destes poços, a partir de dados dos proprietários, como é o caso dos poços TRP-05, TRP-06 e TRP-17 (Figura 29). O poço ponteira TRP-05 em seus primeiros 4 m apresenta fração lamosa, com seus 4 m até 17 m apresentando porção arenosa de coloração branca e dos seus 17 m até 20 m apresenta areia amarelada, onde a água aparentou maior turbidez. O poço ponteira TRP-06 apresenta fração lamosa em seus primeiros 5 m, dos 5 m até 17 apresentando areia de coloração branca. Por fim, o

poço TRP-17 apresentando integralmente areias de coloração branca até sua profundidade final de 18 m.



Figura 29. Poços ponteira TRP-05, TRP-06 e TRP-17 respectivamente, como diferentes formas de captação.

Além dos poços cadastrados, os poços tubulares da CORSAN e RIMAS adquiridos ao banco de dados, também captam águas do SAC e fornecem informações importantes em relação à distribuição das camadas de sedimentos, assim como as unidades hidroestratigráficas presentes na região. Portanto, foram elaboradas seções a partir destes poços que auxiliam na visualização do SAC na área de estudo.

A seção B-B' (Figura 30), apresenta camadas arenosas com espessuras que variam de 18 a 29 m, apresentam areias de coloração branca a amarelada, com granulometria muito fina à média. Abaixo destes sedimentos, encontram-se camadas de argila ou areias argilosas, com espessuras que vão de 4 até 8 m. Em especial, o poço TAR-01 apresenta uma camada onde há conteúdo fóssilífero, com fragmentos de conchas e concreções cônicas, o último provavelmente associado a tubos de ophiomorpha (*Calchirus sp.*) conforme descrito previamente por Tomazelli (1985) presentes em depósitos marinhos da barreira III. Neste poço também se observa uma camada de seixos e blocos de basalto com 4 m de espessura, provavelmente associada aos antigos sistemas de paleoleques presentes na região, o que requer mais estudos e correlações para determinar sua origem. Nesta porção analisada, o aquífero costeiro encontra-se em uma condição livre associada aos primeiros 18 e 30 m onde ocorrem os sedimentos arenosos da barreira III.



Figura 30. Seção B-B' elaborada a partir do software Strater 5 com detalhe maior para o SAC, onde é possível observar a relação das camadas entre os poços, com a base da porção arenosa em correlação.

A seção C-C' (Figuras 27 e 31), NW-SE, também representa a variação lateral dos sedimentos que compõem o aquífero costeiro. Apresenta uma camada arenosa com granulometria que varia de muito fina a média, com uma espessura que vai de 8 a 30 m. As camadas argilosas e com sedimentos lamosos apresentam espessuras que variam de 2 a 20 metros, em especial na porção mais centro-leste da região estudada, onde as camadas argilosas e areno-argilosas atingem maiores espessuras. Destaca-se também o poço TAR-12, semelhante ao poço TAR-01, o qual também apresenta uma camada cascalhosa de basaltos com espessura de 2 m. É possível que ao observar a Seção C, do segmento TAR-09 – TAR-10, o aquífero seja composto por sedimentos do Sistema Laguna-Barreira III dadas as características das camadas, constituindo um aquífero livre associado aos sedimentos arenosos descritos anteriormente. Ainda, os poços JP817 e CT-15 são provavelmente representativos do Sistema-Laguna-Barreira IV, representado pelos sedimentos areno-argilosos do poço JP817, este como um aquífero semiconfinado pela presença de camadas argilosas em seu topo, embora tenha como representativo apenas um poço de monitoramento.

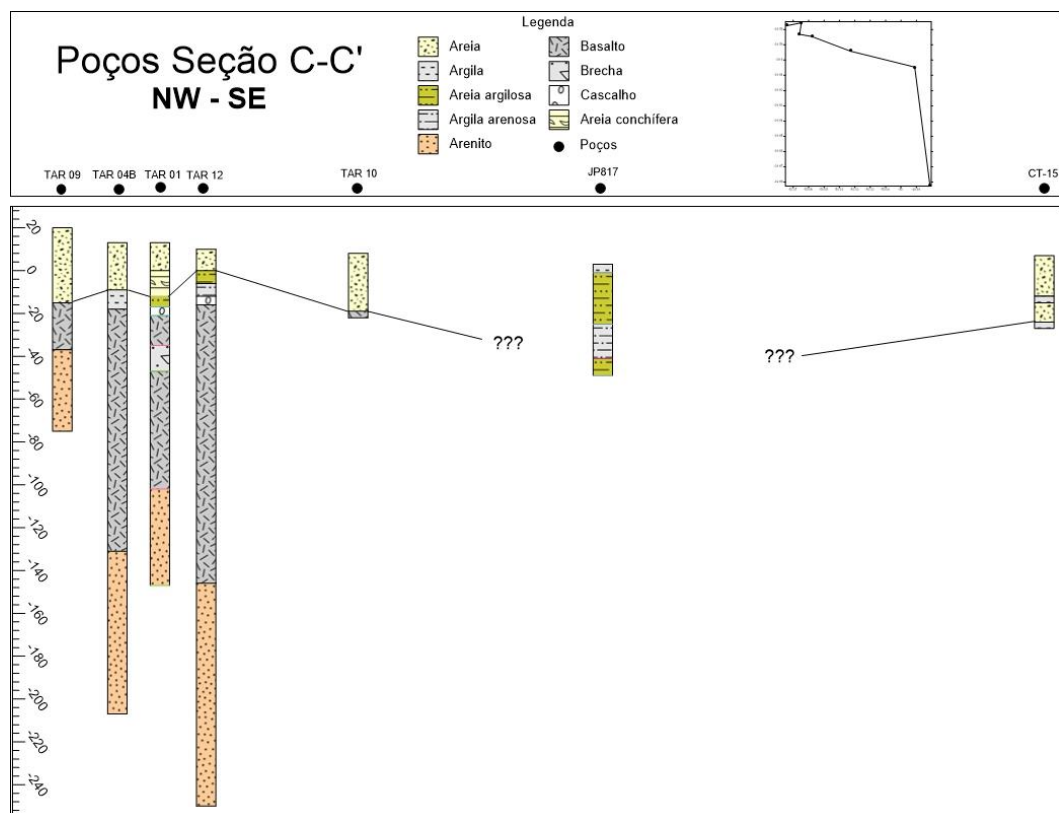


Figura 31. Seção C-C' elaborada através do software Strater 5 onde é possível observar a transição das camadas arenosas para as camadas argilosas e areno-argilosas do poço JP817 RIMAS.

### 4.3 Avaliação Hidroquímica e da Qualidade da Água Subterrânea

Para análise hidroquímica foram levados em conta dados físico-químicos obtidos em campo e de relatórios de análises realizada pela CORSAN processados posteriormente com o auxílio do software *Microsoft Excel* e o software *Qualigraf*.

#### 4.3.1 Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani

A seguir, alguns parâmetros hidroquímicos foram analisados para melhor caracterização das águas presentes no aquífero. Foram levados em conta poços com dados de condutividade elétrica, sólidos totais e pH. Também foram avaliados os diagramas Piper e Stiff para melhor compreensão das águas subterrâneas. Também, foi feita a análise referente à qualidade da água, tanto para irrigação, quanto para sua potabilidade. Por fim, essa avaliação foi realizada separando os poços que captam exclusivamente o SAG, dos poços que captam misturas de águas, já que alguns destes poços apresentam seções filtrantes nos sedimento que compõem o SAC.

A condutividade elétrica (CE) pode ser considerada como um parâmetro que analisa a facilidade de condução de uma corrente elétrica pela água, na qual tem re-

lação com o conteúdo de sais ou íons presentes na mesma. Para os poços que captam águas exclusivamente do SAG, grande parte apresenta valores inferiores a 350  $\mu\text{S/cm}$  (62,5%) dos 8 poços tubulares analisados. A tabela (7) representa a variação estatística.

Tabela 7. Dados estatísticos para condutividade elétrica dos poços no SAG.

<i>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>) (SAG)</i>	
Média	309,39
Mediana	276,00
Desvio Padrão	102,49
Mínimo	226,00
Máximo	475,00

Durante o trabalho de campo também foi possível analisar com maior detalhe a variação vertical da condutividade elétrica do poço TAR-13 através do equipamento SOLINST, com sonda de CE e sensor de temperatura acoplados. Para o poço TAR-13 (Tabela 8), os valores não apresentaram anomalias, apenas um leve aumento na CE com o aumento da profundidade, que representa melhor o SAG da região.

Tabela 8. Dados obtidos a partir do equipamento SONLIST para o poço TAR-13.

<i>Profundidade (m)</i>	<i>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</i>	<i>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>
17,55	191	21,2
36	192	21,2
47	191	21,2
64	202	21,2
78	219	21,1
98	261	21,1

Quanto aos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), estão associados à concentração total de material dissolvido presente na água. A partir deste parâmetro é possível analisar a salinidade das águas subterrâneas conforme a tabela (9) a seguir:

Tabela 9. Tabela adaptada de Fetter (1994) onde mostra a classificação das águas subterrâneas a partir dos STD.

<i>Categoria</i>	<i>Sólidos Totais Dissolvidos (mg/l)</i>
Água doce	0 - 1000
Água salobra	1000 - 10000
Água salina	10000 - 100000
Salmoura	> 100000

Os poços que captam o SAG apresentam valores de STD pouco variáveis (Tabela 10), sempre correlacionados aos valores de CE. Dos 8 poços com dados, todos apresentaram águas doce. No geral, apresentam valores inferiores a 200 mg/l de STD (62,5%).



Tabela 10. Dados estatísticos para os sólidos totais dissolvidos dos poços no SAG.

<i>STD (mg/l) (SAG)</i>	
Média	200,08
Mediana	188,00
Desvio Padrão	54,12
Mínimo	153,00
Máximo	289,80

O pH, uma escala numérica adimensional, fornece informações importantes quanto à acidez ou basicidade de soluções, e neste caso atribuído às águas subterâneas. O pH das águas do SAG não apresenta grandes variações, com valores que se encontram entre 7,3 e 8,0 (Tabela 11). No geral, os valores abaixo de 8, podem estar relacionados com entradas de água associadas ao SASG, já que este aquífero apresenta águas mais ácidas devido ao menor período de residência das mesmas, com rápida recarga e renovação das águas.

Tabela 11. Dados estatísticos para o pH dos poços no SAG.

<i>pH (SAG)</i>	
Média	7,79
Mediana	7,95
Desvio Padrão	0,27
Mínimo	7,30
Máximo	8,00

Continuando a avaliação hidroquímica do SAG, a partir do *software Qualigraf*, foram utilizados dados hidroquímicos de 7 poços que captam águas deste aquífero. A partir destes dados, foi gerado um Diagrama Piper que agrupa os principais ânions e cátions presentes, o qual permite assim a classificação das águas em determinadas classes (Figura 32).

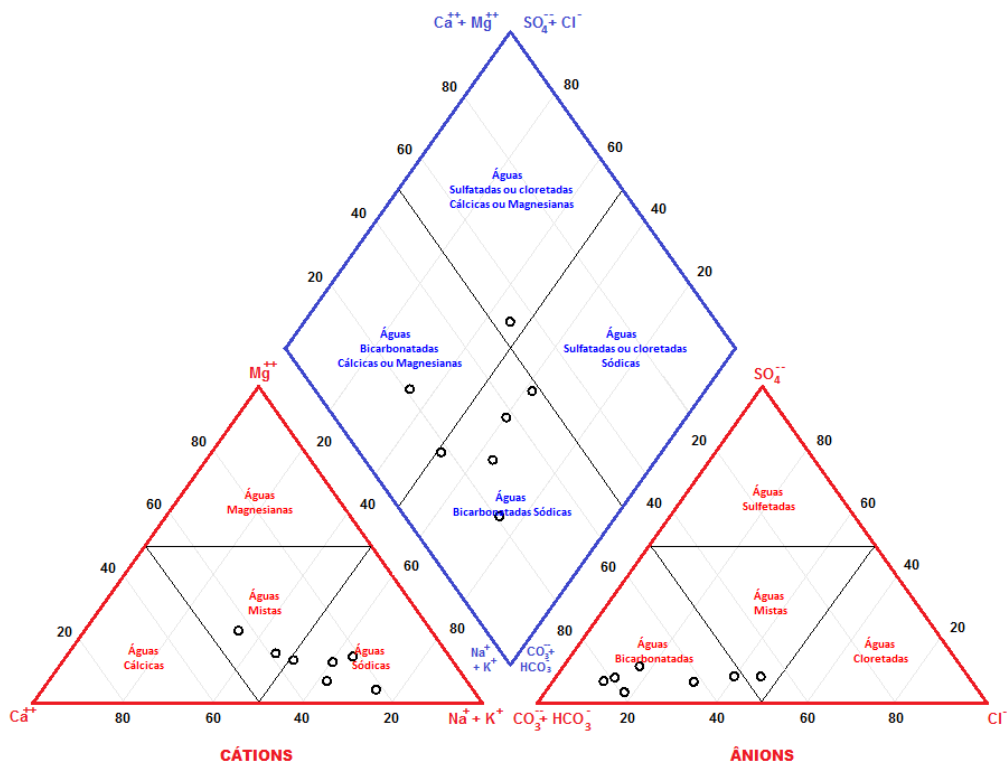


Figura 32. Diagrama Piper para o SAG na área de estudo, com os pontos circulares representando os poços TAR de acordo com os principais ânions e cátions presentes nas águas.

As águas apresentaram um espectro variado, porém grande parte foi classificada como águas bicarbonatadas sódicas (71,4%), seguidas por águas Sulfatadas ou Cloretadas Cálcidas ou Magnesianas, classificada como Cloretada Cálcida ( $Cl > SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ ), e outra como bicarbonatada cálcica ou magnesiana classificada como bicarbonatada cálcica ( $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ ) (Tabela 12). Estes dados demonstram a predominância do sódio e potássio em relação aos demais cátions, além da predominância dos bicarbonatos e carbonatos em relação aos demais ânions.

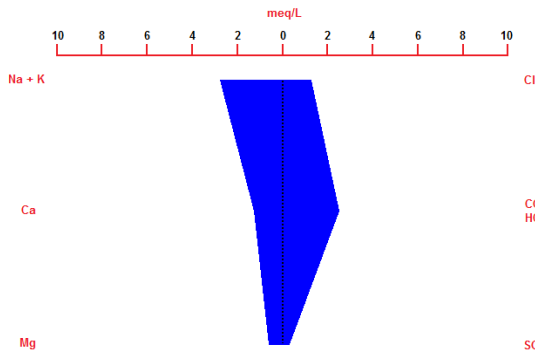
Tabela 12. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas para o Diagrama Piper para o SAG.

Poços	Na + K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	Classificação das águas
TAR01	65	25,2	7,5	44	151	13,4	Bicarbonatada Sódica
TAR02	37	26,4	6,7	74	130	19,2	Sulfatadas ou Cloretadas Cálcidas ou Magnesianas
TAR05	68	29,9	4,2	63	144	19,1	Bicarbonatada Sódica
TAR06	46,4	11,8	1,5	11	117	9,7	Bicarbonatada Sódica
TAR08	35,3	21,4	5,1	10	130	9	Bicarbonatada Sódica
TAR09A	46	13,5	5,7	17,3	129	16,9	Bicarbonatada Sódica
TAR13	15,15	16,6	5,43	8,6	68	2,5	Bicarbonatada Cálcica ou Magnesiana

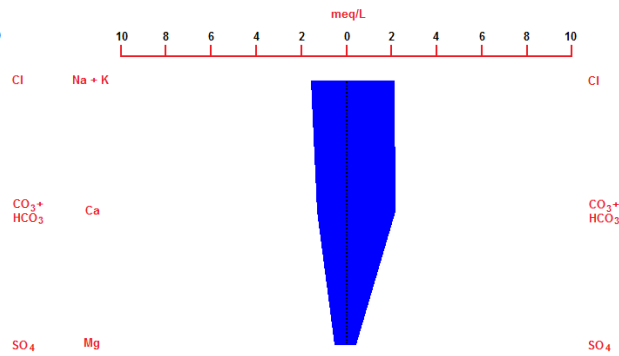
Além do Diagrama Piper, também foram gerados Diagramas Stiff, que são diagramas também muito úteis quanto à avaliação de diferentes grupos de águas a partir

dos principais ânions e cátions presentes. Estes diagramas apresentam formas geométricas a partir destes íons, as quais facilitam a identificação de prováveis anomalias ou também uma relação com um determinado aquífero e sua litologia.

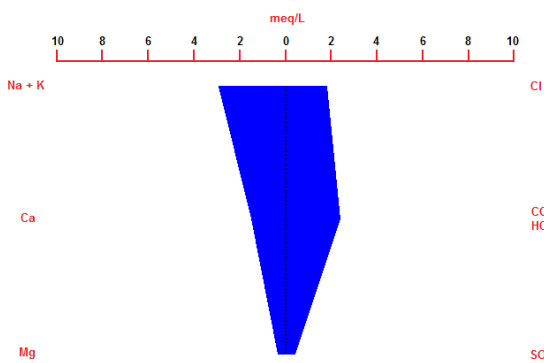
TAR-01



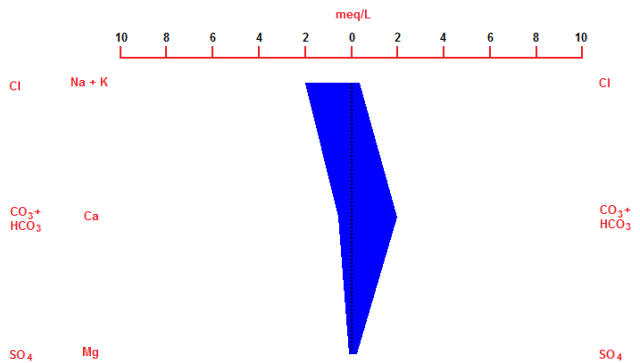
TAR-02



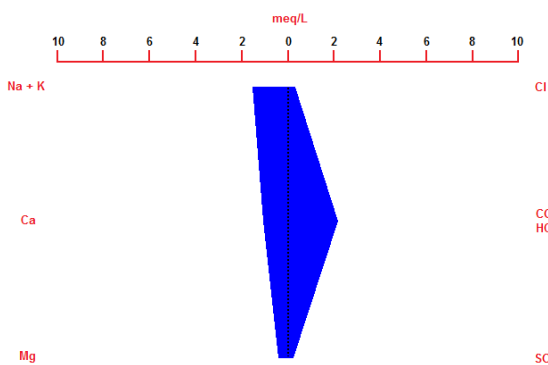
TAR-05



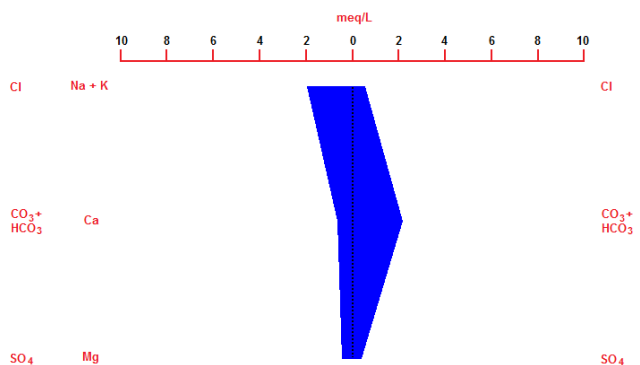
TAR-06



TAR-08



TAR-09A



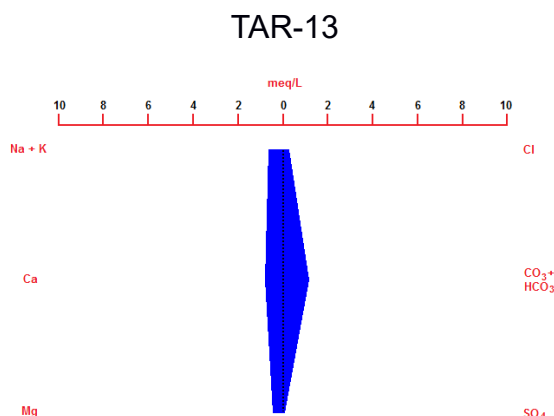


Figura 33. Diagramas Stiff para os diferentes poços que captam águas do SAG. Ânions e cátions medidos em meq/L.

Quando comparadas às classes de águas obtidas a partir do Diagrama Piper, nota-se que as águas bicarbonatadas sódicas apresentam geometrias semelhantes nos Diagramas Stiff, com exceção dos poços TAR-02 e TAR-13 que apresentam valores de Na+K inferiores aos demais poços, por se tratarem de águas cloretada cálcica e bicarbonatada cálcica, respectivamente, com o cátion  $\text{Ca}^{2+}$  predominante. O poço TAR-02, por se tratar de uma água de composição diferente, provavelmente apresenta alguma influência do SAC e por consequência mistura de águas. O seu perfil, apresenta uma grande espessura de sedimentos e, por mais que estejam selados pelo revestimento e cimentação do poço tubular, durante períodos de bombeamento é provável que águas do SAC descendam e alteram a qualidade das águas neste poço.

A análise da qualidade da água para irrigação pode ser feita através do diagrama elaborado pelo *United States Salinity Laboratory (USSL)*, a partir dos dados  $\text{Na}^+$ (mg/l),  $\text{Ca}^{2+}$ (mg/l),  $\text{Mg}^{2+}$ (mg/l), Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e SAR (Razão de Absorção de Sódio) conforme a figura (34) a seguir.

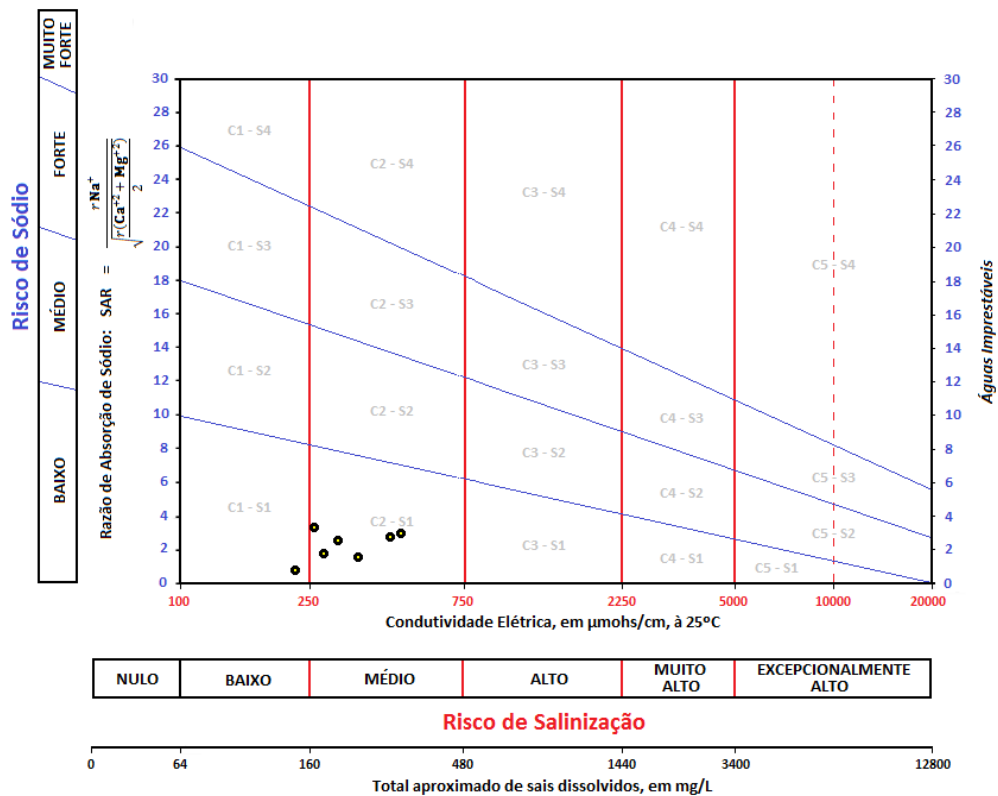


Figura 34. Diagrama USSSL para os poços TAR com risco à salinização e de sódio.

A partir do diagrama nota-se que a classe C2-S1 é constituída pela grande maioria dos poços, com médio risco para salinização e baixo risco de sódio, além do poço TAR-13 como o único com baixo risco para salinização e de sódio.

A qualidade da água também deve ser avaliada quanto à sua potabilidade de acordo com cada parâmetro presente no banco de dados levantado, para isso é necessária a comparação com os Valores Máximos Permitidos (VMPs), conforme definido pela portaria nº888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021).

A tabela (13) abaixo tem como exemplo os dados para alguns poços TAR em relação aos VMPs estabelecidos pela portaria:

Tabela 13. Análise da qualidade das águas do SAG na região em relação aos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita.

Parâmetro	TAR-01	TAR-05	TAR-08	TAR-13	VMP
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS QUE REPRESENTAM RISCO À SAÚDE					
Fluoreto (mg/l)	0,5	0	0	0,2	1,5
Nitrato (mg/l)	0	0,1	0	0,28	10
PADRÃO ORGANOLÉPTICO DE POTABILIDADE					
Cloreto (mg/l)	12	63	10	8,6	250
Cor aparente (uH)	3	0	0	0,45	15
Dureza total (mg/l)	51	91,9	74,3	61,3	300
Ferro (mg/l)	0,1	0	0	0	0,3
Manganês (mg/l)	0,07	0	0	0	0,1
Sódio (mg/l)	47	67	35,1	14,7	200
STD <sup>1</sup> (mg/l)	242,8	264	153	158	500
Sulfato (mg/l)	3,4	19,1	9	2,51	250
Turbidez (uT)	0	0	0	0,21	5

Se observa a boa qualidade das águas do SAG associada a potabilidade, com todos os parâmetros inferiores aos VMPs. O poço TAR-01 apresenta alguns parâmetros como ferro e manganês próximos do limite estabelecido.

#### 4.3.1.1 Hidroquímica do SAG com mistura de águas

Alguns poços tubulares presentes no banco de dados apresentaram anomalias para os parâmetros físico-químicos analisados estatisticamente e através de diagramas Piper, Stiff e USSL. Os poços com anomalias apresentam influência do SAC, já que possuem seções filtrantes nos sedimentos, assim como atravessaram maiores espessuras de sedimentos (arenosos e argilosos).

Tabela 14. Parâmetros físico-químicos analisados estatisticamente para anomalia presente no SAG.

CE ( $\mu\text{S/cm}$ ) (SAG-SAC)		STD (mg/l) (SAG-SAC)		pH (SAG-SAC)	
Média	2918,00	Média	1924,25	Média	8,03
Mediana	1893,00	Mediana	1057,50	Mediana	8,25
Desvio Padrão	2839,43	Desvio Padrão	2156,71	Desvio Padrão	0,56
Mínimo	813,00	Mínimo	453,00	Mínimo	7,20
Máximo	7073,00	Máximo	5129,00	Máximo	8,40

Ao todo foram analisados quatro poços (TAR-03, TAR-04A, TAR-04B e TAR-12) com anomalias presentes (Tabela 14). A CE apresenta altos valores, associados principalmente aos poços TAR-04A, TAR-04B e TAR-12, com números que ultrapassam 1000  $\mu\text{S/cm}$ . O poço TAR-03 apresenta 813  $\mu\text{S/cm}$ , o valor mínimo observado. Quanto aos STD, acompanha os valores representados pela condutividade elétrica, já que os poços TAR-04A, TAR-04B e TAR-12 apresentam os maiores valores, enquanto que o poço TAR-03 o menor. Por fim, o pH indicou a presença de águas básicas, com sua maioria acima de 8, com exceção do poço TAR-04B o qual apresentou o valor mínimo,

o que pode indicar sua maior influência pelo SAC, além de seus valores de CE e STD observados como os mais elevados entre os demais poços (Tabela 15).

O Diagrama Piper (Figura 35) permitiu a classificação das águas com influência do SAC a partir dos principais íons constituintes:

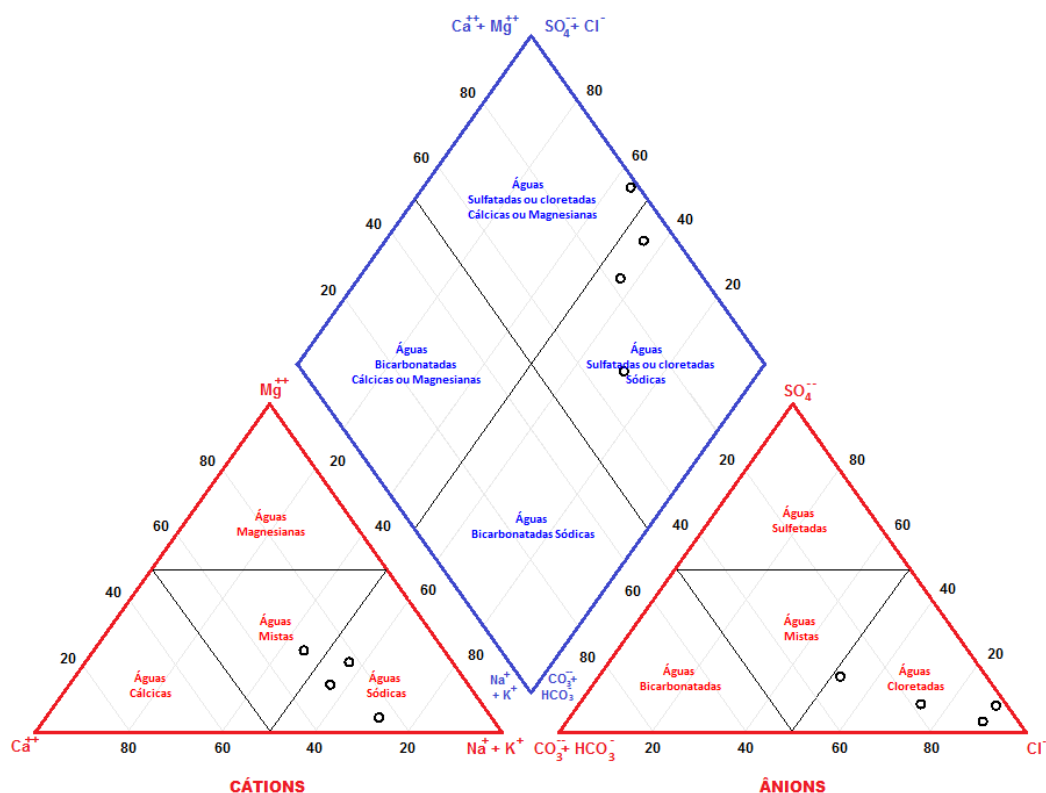


Figura 35. Diagrama Piper para o SAG com influência do SAC na área de estudo, com os pontos circulares representando os poços TAR de acordo com os principais ânions e cátions presentes nas águas.

Ao todo as águas de três poços foram caracterizadas como águas cloretadas sódicas, o poço TAR-04B foi apresentada águas cloretadas cálcica ou magnesianas, classificada como cloretada cálcica já que há uma predominância do cálcio em relação ao magnésio. Se observa que existe uma maior ocorrência do ânion cloreto em relação ao bicarbonato e carbonato, diferentemente do que se observa nas águas analisadas para os poços que captam unicamente o SAG (Tabela 15).

Tabela 15. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas do Diagrama Piper para o SAG com influência do SAC.

Poço	Na+K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	Classificação das Águas
TAR03	126,6	37,6	4,5	134	140	61	Cloretada Sódica
TAR04A	186	64	38	370	158	60,9	Cloretada Sódica
TAR04B	744,5	438	223	2699	114	344	Cloretada Cálcica ou Magnesianas
TAR12	292,2	136	41,3	964,6	139	52,4	Cloretada Sódica

Os diagramas Stiff (Figura 36) também reforçam a distribuição dos íons que diverge da observada nos diagramas Stiff observados para os poços que captam águas somente do SAG. Destaca-se a anomalia presente para os cloretos, que provavelmente estão associados à influência do SAC no SAG.

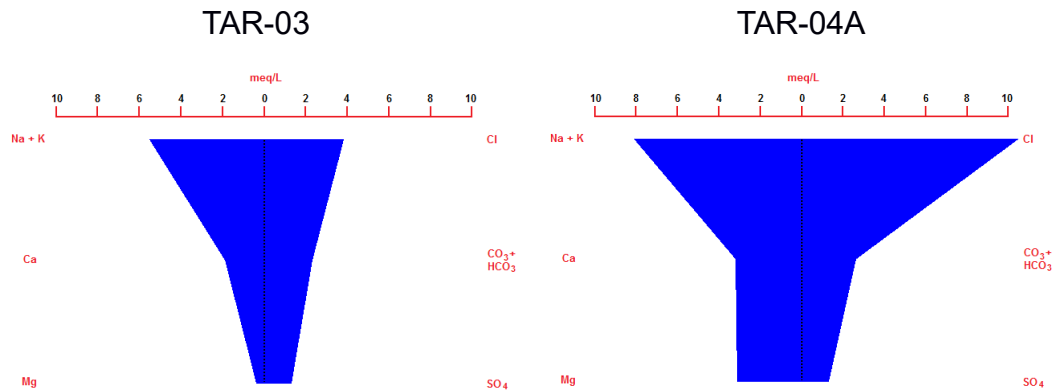


Figura 36. Diagramas Stiff para os poços que captam águas do SAG com influência do SAC, ânions e cátions medidos em meq/L.

Também foi realizada uma análise quanto à qualidade da água para irrigação para os poços com influência do SAC, conforme o diagrama USSL a seguir (Figura 37):

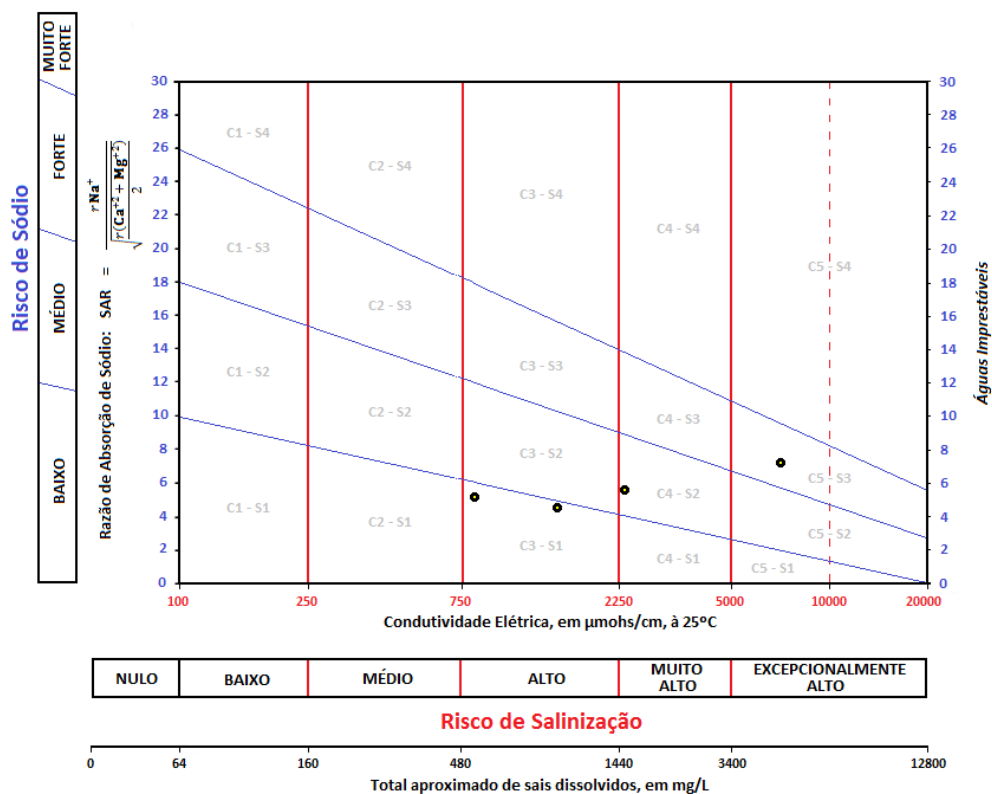


Figura 37. Diagrama USSL para os poços TAR com o risco à salinização e de sódio, para os poços do SAG com influência do SAC.



Foram utilizados poços com entradas d'água no SAC e, portanto, algumas anomalias são apresentadas neste diagrama. A partir do diagrama nota-se que a classe C2-S1 é constituída pela grande maioria dos poços, com médio risco para salinização e baixo risco de sódio. Enquanto que o poço TAR-04B apresenta um risco excepcionalmente alto para salinização e forte risco para sódio. Os demais poços, todos com influência do SAC, apresentam alto a muito alto risco à salinização, com baixo a médio risco de sódio.

A qualidade da água também foi avaliada quanto à potabilidade para os poços com misturas de águas do SAC e SAG, para isso é necessária a comparação com os Valores Máximos Permitidos (VMPs), conforme definido pela portaria nº888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021).

A tabela (16) abaixo tem como exemplo os dados para os poços TAR com influência do SAC em relação aos VMPs estabelecidos pela portaria:

Tabela 16. Análise da qualidade das águas do SAG na região com misturas de águas a partir de parâmetros do banco de dados. As células em vermelho representam as substâncias que se encontram acima dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita.

Parâmetro	TAR-03	TAR-04A	TAR-04B	TAR-12	VMP
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS QUE REPRESENTAM RISCO À SAÚDE					
Fluoreto (mg/l)	0,7	0,6	0,3	0,4	1,5
Nitrato (mg/l)	0,076	0	0	0	10
PADRÃO ORGANOLÉPTICO DE POTABILIDADE					
Cloreto (mg/l)	134	370	2699	964,6	250
Cor aparente (uH)	0	3	0	0	15
Dureza total (mg/l)	112,1	316	2009	510	300
Ferro (mg/l)	0	0	0,1	0	0,3
Manganês (mg/l)	0,007	0	0	0,115	0,1
Sódio (mg/l)	126	185	740	52,4	200
STD <sup>1</sup> (mg/l)	453	966	5129	1149	500
Sulfato (mg/l)	61	60,9	344	52,4	250
Turbidez (uT)	0,34	0,8	0,7	0,22	5

#### <sup>1</sup>Sólidos Totais Dissolvidos

No geral se observa que os poços TAR-04A, TAR-04B e TAR-12 apresentam anomalias quanto aos valores de dureza, STD e cloretos e sulfato, além de que o poço TAR-12 apresenta valores acima da portaria referente ao e manganês, também constatado por Reginato *et al.* (2008) ao longo dos poços que captam o SAC. Estes poços também apresentam valores elevados para condutividade elétrica, dada a alta concentração de sais, ultrapassando 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . O poço TAR-03, apesar de não apresentar valores que ultrapassem os VMPs, tem parâmetros como cloretos, STD e sódio que se encontram próximos do limite estabelecido.

### 4.3.2 Hidroquímica do Sistema Aquífero Costeiro

Para avaliação hidroquímica do SAC foram utilizados dados obtidos a partir dos poços do tipo ponteira e tubulares cadastrados na região. Em todos os poços foram analisados parâmetros como Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e pH. Alguns poços com anomalia presente foram coletadas amostras de água para análise em laboratório como  $F^-$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ , Dureza ( $CaCO_3$ ),  $Cl^-$  e  $NO_3^-$ .

A condutividade elétrica no geral apresenta valores dentro do esperado para um aquífero livre e com pouco tempo de residência das águas (Tabela 17). A maior parte dos poços apresenta uma CE inferior a  $150 \mu S/cm$  (82,1%), enquanto que 57,1% apresentam valores inferiores a  $100 \mu S/cm$ . Também foram observadas anomalias em três poços, TRP-13, TRP-14 e JP817, com valores de 502, 1231 e 2825  $\mu S/cm$ , respectivamente.

Tabela 17. Dados estatísticos para a condutividade elétrica dos poços no SAC.

CE ( $\mu S/cm$ ) (SAC)	
Média	240,60
Mediana	88,00
Desvio Padrão	556,59
Mínimo	29,00
Máximo	2825,00

Os poços com anomalias presentes provavelmente estão associados à porção do aquífero costeiro constituída por sedimentos lagunares holocênicos na região mais a leste do município. Estes sedimentos tendem a condicionar a água do aquífero com o aumento de cloretos e outros íons que podem ocasionar em altos valores de CE como observado nos poços TRP-13, TRP-14 e JP817.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) podem ser diretamente relacionados aos valores obtidos a partir da CE. Ao analisar estatisticamente dos dados (Tabela 18), nota-se que 57,1% dos poços apresentam valores de STD inferiores a 50 mg/l e 89,3% inferiores a 100 mg/l, os poços TRP-13, TRP-14 e JP817 também apresentaram valores anômalos para os STD, com 251, 619 e 1833,3 mg/l, respectivamente.

Tabela 18. Dados estatísticos para os sólidos totais dissolvidos dos poços no SAC.

STD (mg/l) (SAC)	
Média	139,08
Mediana	47,50
Desvio Padrão	360,91
Mínimo	14,00
Máximo	1883,33

As anomalias de CE presentes nos poços TRP-13, TRP-14 e JP817 também são representadas pelos valores de STD, o que reforça a suposição quanto à origem deste

problema de qualidade da água, estando provavelmente associada aos sedimentos lagunares holocênicos presentes em Terra de Areia. Como abordado no item 4.2.2, representam frações lamosas ricas em matéria orgânica que contribuem para esta condição das águas captadas nestes poços.

A partir do processamento dos dados, verifica-se que 100% das águas do aquífero são consideradas ácidas, o que reforça a presença de um aquífero livre, que tem uma grande influência de águas meteóricas, com um tempo de residência muito recente. Observa-se que grande parte das águas tem um pH inferior a 5,5 (60,7%), enquanto que apenas 28,6% apresentam um pH superior a 6 (Tabela 19).

*Tabela 19. Dados estatísticos para o pH dos poços no SAC*

<i>pH (SAC)</i>	
Média	5,43
Mediana	5,42
Desvio Padrão	0,76
Mínimo	4,00
Máximo	6,85

Também foram elaborados diagramas Piper (Figura 38) e Stiff (Figura 39) para os poços do SAC, que permitiram observar a variação das classes de águas de acordo com o tipo de sedimentos presentes, o poço JP817 representativo dos depósitos lagunares siltico-argilosos, e os depósitos de barreira captados pelo poço JP818, formado essencialmente por sedimentos arenosos.

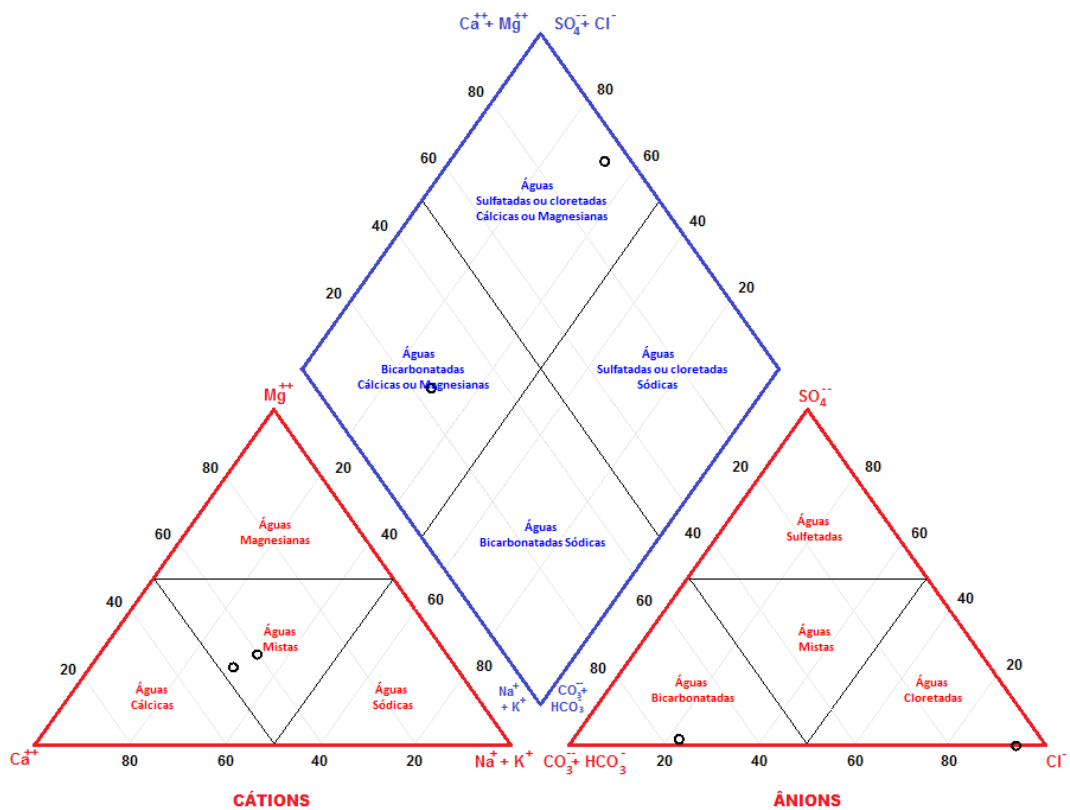


Figura 38. Diagrama Piper para os poços que captam águas do SAC, com duas classes distintas, simbolizados pelos pontos circulares.

A partir da plotagem no diagrama são observadas classes de águas cloretada cálcica ou magnesiana (JP817), classificada como cloretada cálcica ( $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ ), e bicarbonatada cálcica ou magnesiana também classificada como bicarbonatada cálcica ( $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ ) (Tabela 20).

Tabela 20. Dados dos poços TAR utilizados para classificação de águas para o Diagrama Piper para o SAC.

Poços	Na + K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Cl (mg/l)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	Classificação das águas
JP817	233,6	230	95,6	970	108,7	0,12	Cloretada Cálcica ou Magnesiana
JP818	9,6	12,5	3,8	10	60	1,22	Bicarbonatada Cálcica ou Magnesiana

Os diagramas Stiff (Figura 39) reforçam as divergências presentes no SAC a partir dos poços JP817 e JP818, com forte anomalia presente no poço JP817, tanto para cloretos, quanto para sódio e potássio, além de cálcio e magnésio.

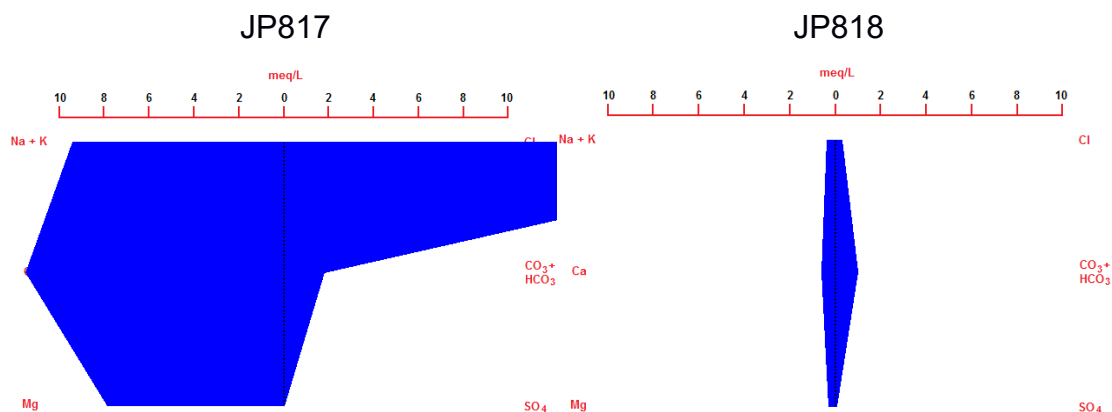


Figura 39. Diagramas Stiff para os poços que captam águas do SAC. Ânions e cátions medidos em meq/L.

A obtenção de dados em campo para os parâmetros presentes na tabela (21), é importante para a avaliação da qualidade das águas do SAC referente a sua potabilidade, com base nos VMPs estabelecidos pela portaria nº888 de consolidação (BRASIL, 2021).

Tabela 21. Análise da qualidade das águas do SAC na região, a partir de parâmetros obtidos em campo. As células em vermelho representam as substâncias que se encontram acima dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) à direita.

Parâmetro	TR-04	TR-05	TR-13	TR-14	TR-20	TR-23	TR-24	JP-817	VMP
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS QUE REPRESENTAM RISCO À SAÚDE									
Fluoreto (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0,058	1,5
Nitrato (mg/l)	1,84	0,469	0,7	0,4	5,33	2,02	ND	0,24	10
Cobre (mg/l)	0	0	0	0	3,8	0,04	0	0,005	2
Cromo (mg/l)	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0,005	0,05
PADRÃO ORGANOLÉPTICO DE POTABILIDADE									
Cloreto (mg/l)	7,04	6,17	68,4	222	8,61	13,9	7,55	859,8	250
Ferro (mg/l)	0	0,01	0,16	0	0,34	3,85	0,1	6,36	0,3
Dureza total (mg/l)	0	0	0	0	0	20	0	0,15	300
Manganês (mg/l)	0	0	0	0,006	0	0,006	0	1,22	0,1
STD <sup>1</sup> (mg/l)	50	16	251	619	35	96	26	-	500

<sup>1</sup>Sólidos totais dissolvidos

Se observa que os poços TRP-14, TRP-20, TRP-23 e JP817 apresentam valores acima do permitido pela portaria nº888 de 2021. O poço TRP-14 apresenta valores significativos de STD, o que impede o consumo da água, assim como os cloretos, também com anomalia representada pelo poço JP817, apesar de não ultrapassarem o valor máximo permitido, encontram-se no limite, o que demonstra a má qualidade para este poço. Os poços TRP-20, TRP-23 e JP818 apresentam valores acima para ferro, algo comum para o aquífero costeiro conforme mencionado por Reginato *et al.* (2008), com provável origem natural.

O poço TRP-14 e JP817 captam águas presentes no SAC constituído majoritariamente por sedimentos argilosos e siltosos lagunares holocênicos, o que pode explicar a má qualidade, a alta concentração de sais e cloretos presente nas águas, como também observado pelos valores de CE. O poço TRP-13 apesar de apresentar águas dentro do padrão de potabilidade também tem valores acima da média para os valores de cloreto, o que pode estar relacionado à maior profundidade para este poço, com 37 m é o mais profundo dentre os poços do tipo ponteira cadastrados na região.

#### 4.4 Avaliação da Ocorrência de Cloretos

Como analisado nos itens anteriores, os cloretos apresentam anomalias tanto nos poços que captam o SAC, quanto nos que captam o SAG. A presença de cloretos pode estar atrelada a diversos fatores como intrusões salinas ou ainda por características naturais da rocha que compõem o aquífero, como é o caso para os sedimentos inconsolidados do Sistema Aquífero Costeiro na região de Terra de Areia. Uma vez que os poços que captam águas do SAG apresentem cloretos, leva-se em conta que estes poços têm influência do SAC, já que ao observar seus perfis geológicos apresentam entradas d'água em sedimentos constituintes do SAC.

Para isso, foi feita a análise estatística para a ocorrência de cloretos ao longo dos dois aquíferos, assim como para os poços do SAG que apresentam influência do SAC (Tabela 22).

*Tabela 22. Dados estatísticos para os cloretos nos poços que captam ambos os aquíferos, assim como os poços do SAG com influência do SAC.*

<i>Cloretos (mg/l) (SAG)</i>		<i>Cloretos (mg/l) (SAG-SAC)</i>		<i>Cloretos (mg/l) (SAC)</i>	
Média	26,10	Média	1041,90	Média	144,52
Mediana	12,00	Mediana	667,30	Mediana	10,04
Desvio Padrão	25,92	Desvio Padrão	1158,69	Desvio Padrão	312,72
Mínimo	8,60	Mínimo	134,00	Mínimo	6,17
Máximo	74,00	Máximo	2699,00	Máximo	957,00

Como se observa, a partir dos oito poços analisados para o SAG, os cloretos não demonstram anomalias, com uma média de 26,1 mg/l para este parâmetro. Com exceção do poço TAR-02 que, como mencionado anteriormente e demonstrado pelos diagramas Piper e Stiff, apresenta uma composição levemente destoante, o que representa uma certa influência do SAC para este poço, como também representado como valor máximo para os cloretos dentre os poços do SAG. Para os poços do SAG com entradas d'água no aquífero costeiro, já se observa a presença da anomalia de cloretos em quase todos os poços com valores que ultrapassam 500 mg/l. As anomalias de cloretos também são observadas nos poços que captam águas exclusivamente do SAC, porém associadas aos poços (TRP-13, TRP-14 e JP817) que captam águas

das camadas de sedimentos siltico-argilosas lagunares, situação também observada nos poços do SAG que apresentam misturas de águas do SAC.

A partir do mapa geológico e os poços com anomalias (Figura 40) se observa esta relação dos sedimentos lagunares e as anomalias de cloretos presente nos poços que captam o SAG com misturas de águas e poços que captam o SAC.

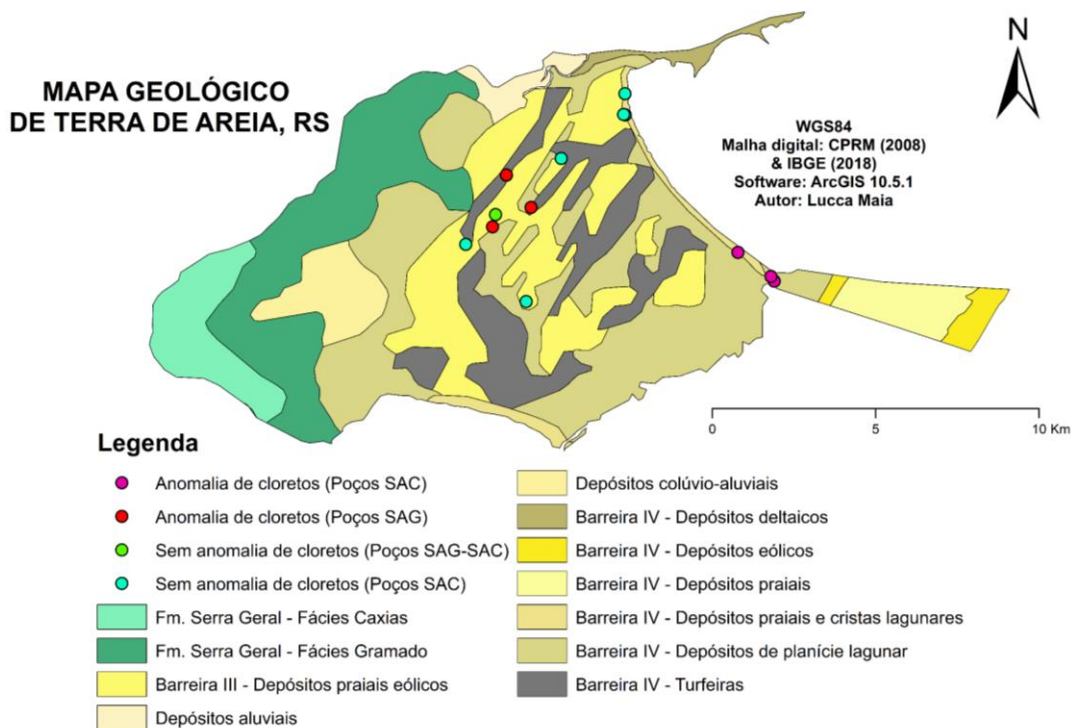


Figura 40. Mapa geológico elaborado a partir de dados da CPRM (2008) e dados do autor, para os poços com anomalias de cloretos

A partir do mapa, constata-se a presença dos poços TAR que foram instalados em regiões onde ocorrem sedimentos lagunares e de turfeiras. Os poços TAR-04A, TAR-04B, TAR-12 (Figura 41) e TAR-03 apesar de captarem águas do SAG, apresentam entradas d'água na porção de sedimentos que compõem o SAC, e neste caso, sedimentos siltico-argilosos e por vezes ricos em matéria orgânica que tornam as águas de baixa qualidade e conseqüentemente com altas concentrações de cloretos.

Também foi apresentado um poço que capta águas do SAG e que não apresentou anomalias relacionadas aos cloretos como os poços mencionados no parágrafo anterior, mas demonstrou águas de composição destoante, como é o caso do poço TAR-02. Este poço tem uma certa influência do SAC, porém como não apresenta problemas de qualidade, é provável que esteja relacionado aos depósitos eólicos de barreira III, que tendem a apresentar águas de melhor qualidade como observado por outros poços que captam águas nesta porção do SAC. Foram cadastrados alguns poços do tipo ponteira que também demonstraram boa qualidade para água e captam águas do SAC, porém associado aos depósitos eólicos de barreira III conforme representados no mapa (Figura 40).

Esta maior concentração observada nos poços pode estar relacionada influência do SAC nas águas do SAG, em regiões onde o SAC esteja relacionado a camadas de sedimentos lagunares que tornam as águas com uma baixa qualidade em relação à potabilidade, já que estes poços apresentam entradas d'água no aquífero costeiro. O poço TAR-12 (Figura 42) exemplifica a presença de entrada d'água que capta águas também do aquífero costeiro e, conforme demonstrado anteriormente com o equipamento SONLIST (Tabela 23), apresenta valores de CE elevados em seus primeiros metros de coluna d'água, o que associa ao SAC a baixa qualidade da água que estes poços em específico apresentam.

*Tabela 23. Dados obtidos a partir do equipamento SONLIST para o poço TAR-12.*

<i>Poço TAR-12</i>		
<i>Profundidade (m)</i>	<i>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</i>	<i>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>
5,36	737	22
9	854	21,1
20	928	21,1
23,7	829	21,1
27	329	20,9
31	302	20,9
41	319	20,9
57	379	20,9
58	337	20,9
86	347	21,1
88	321	21,1
93	400	21
98	410	21



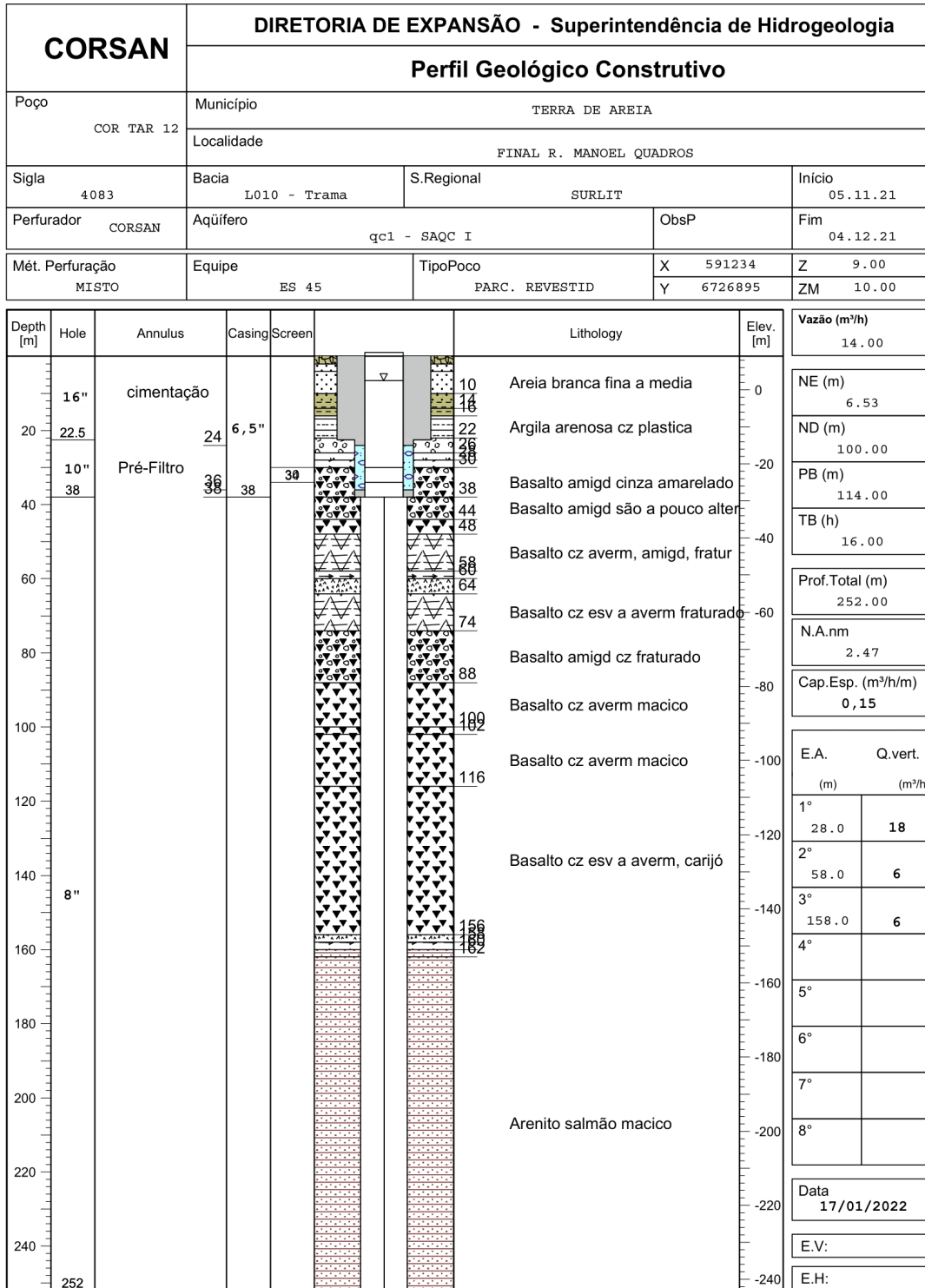
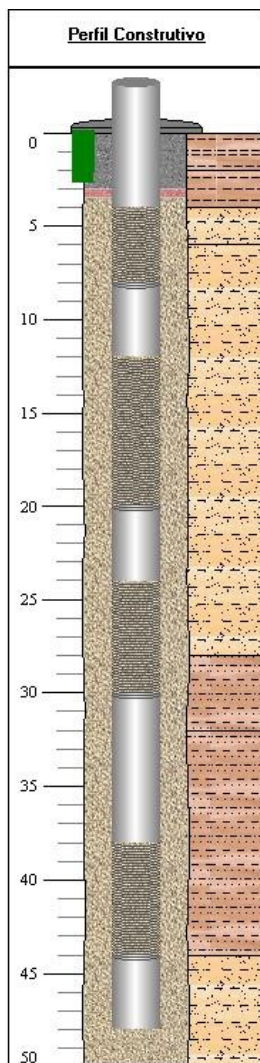


Figura 41. Perfil geológico para o poço TAR-12 elaborado pela CORSAN com destaque para camada do SAC onde ocorrem argilas arenosas próximas à entrada d'água entre 30 e 34 m.



Espessura	Litologia	Descrição
0-2 m	Argila	Argila cinza amarronzado
2-4 m	Argila	Argila marrom
4-6 m	Areia	Areia argilosa
6-28 m	Areia argilosa	Areia argilosa amarela
28-32 m	Argila arenosa	Argila arenosa cinza
32-44 m	Argila arenosa	Argila arenosa cinza amarronzado
44-50 m	Areia argilosa	Areia argilosa

Figura 42. Perfil construtivo geológico para o poço JP817 obtido a partir do SIAGAS.

Os dados adquiridos a partir da CPRM para o poço rimas JP817 (Figura 42) fornecem informações importantes quanto à variação das camadas de sedimentos e também a variação hidroquímica ao longo das seções filtrantes, já que foram coletadas amostras de águas a partir de cada seção filtrante (método a partir de bombeamento e *lowflow*) e posteriormente analisadas (Tabela 24).

Tabela 24. Principais parâmetros físico-químicos analisados estatisticamente presentes no poço JP817, com anomalias em grande parte das análises

Prof. Coleta	6 (m)	18,5 (m)	29,5 (m)	44 (m)	Média	Mediana	Desv. Padrão	Máximo	Mínimo
Cálcio (mg/l)	199,30	245,00	259,08	216,55	229,98	230,78	27,04	259,08	199,30
Magnésio (mg/l)	85,26	104,40	98,35	94,61	95,66	96,48	8,02	104,40	85,26
Manganês (mg/l)	1,26	1,01	1,40	1,38	1,26	1,32	0,18	1,40	1,01
Sódio (mg/l)	163,12	218,00	209,53	177,88	192,13	193,71	25,93	218,00	163,12
Potássio (mg/l)	41,54	39,74	44,10	40,90	41,57	41,22	1,84	44,10	39,74
Bicarbonato (mg/l)	133,90	129,49	130,26	130,92	131,14	130,59	1,93	133,90	129,49
Alcalinidade (mg/l)	109,97	106,14	108,63	107,55	108,07	108,09	1,62	109,97	106,14
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	3101,80	2649,70	3125,90	3036,60	2978,50	3069,20	222,42	3125,90	2649,70
pH	6,95	6,95	6,91	6,84	6,91	6,93	0,05	6,95	6,84
Cloreto (mg/l)	974,55	18,65	971,70	942,30	726,80	957,00	472,33	974,55	18,65
Brometo (mg/l)	3,83	4,02	3,82	3,50	3,79	3,83	0,22	4,02	3,50
Sulfato (mg/l)	0,02	0,42	0,01	0,01	0,12	0,02	0,20	0,42	0,01

No geral, se observa que grande parte das anomalias presentes nas águas do poço JP817 se concentram nas seções filtrantes que captam águas das porções argilosas mais profundas, com a seção filtrante III - 24-30m (Argila arenosa) e a seção filtrante IV - 38-44m (Argila arenosa). O cloreto é o principal parâmetro que evidencia esse fenômeno, já que na seção filtrante II (12-20 Areia argilosa) a água captada apresentou uma queda brusca de 18,6 mg/l, muito abaixo da média de 726 mg/l entre as profundidades analisadas. Os parâmetros ferro e manganês também apresentam valores anômalos, o que é observado em muitos poços que captam águas ao longo do aquífero costeiro, conforme observado previamente por Reginato *et al.* (2008).

Para a compreensão da origem dos cloretos, também foram utilizadas razões iônicas para os poços que apresentaram anomalias. Os poços do SAG com influência do SAC, por não apresentarem análises de bromo, foram feitas razões de cloreto e bicarbonato ( $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ) e sódio e cloreto ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) que fornecem informações importantes quanto à origem da salinidade das águas e por consequência dos cloretos (Tabela 25).

Tabela 25. Razões iônicas para os poços TAR com anomalias de cloretos.

TAR-03		TAR-04A	
Razão iônica	Valor	Razão iônica	Valor
$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^- =$	1,358	$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^- =$	3,304
$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- =$	1,448	$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- =$	0,770

TAR-04B		TAR-12	
Razão iônica	Valor	Razão iônica	Valor
$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^- =$	33,465	$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^- =$	9,837
$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- =$	0,422	$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- =$	0,458

A razão  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  pode ser útil para caracterizar as intrusões marinhas já que águas continentais apresentam valores entre 0,1 e 5, enquanto que nas águas do mar encontram-se valores entre 20 e 50. Já a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  também fornece informações quanto à origem da salinidade, já que as águas marinhas apresentam valores próximos entre 0,87 e 0,89 e a água doce apresenta uma razão entre 0,9 e 1,1, porém quando há deslocamento da água doce por águas marinhas, é comum que a razão sódio/cloreto apresente valores mais baixos que a razão observada para águas marinhas (SANTOS, 2000). Como se observa, os poços com as maiores anomalias de cloretos, apresentam as maiores razões para cloretos e bicarbonatos, o que indica uma maior influência de águas com maiores salinidades durante a deposição dos sedimentos lagunares que recobrem o SAC, dada a proximidade com o mar na época. O mesmo vale para a razão de sódio/cloretos, já que os valores apresentam razões inferiores às observadas para águas marinhas, com exceção do poço TAR-03, que apresenta a menor salinidade e anomalia de cloretos observada.

Como os poços JP817 e JP818 são os únicos poços que apresentam análises de bromo, utilizando o poço JP818 como comparação, foi feita a análise para  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Br}^-$  com base nos estudos realizados por Alcalá & Custódio (2004), com a utilização da razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$ . Também foram observadas as razões de cloreto e bicarbonato ( $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ) e sódio e cloreto ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) para uma análise mais ampla quanto à origem dos cloretos para estes poços (Tabela 26).

Tabela 26. Razões iônicas para os poços JP817 e JP818 do SAC.

JP817		JP818	
Razão iônica	Valor	Razão iônica	Valor
$\text{rCl}^-/\text{rBr}^- =$	597,562	$\text{rCl}^-/\text{rBr}^- =$	274,515
$\text{rCl}^-/\text{rHCO}_3^- =$	13,051	$\text{rCl}^-/\text{rHCO}_3^- =$	0,217
$\text{rNa}^+/\text{rCl}^- =$	0,248	$\text{rNa}^+/\text{rCl}^- =$	1,462

Ao inserir os dados no gráfico (Figura 44), nota-se que para o poço JP817 situa-se acima do campo de contaminação agrícola e próximo da razão encontrada para as águas do mar. O fato de apresentar uma quantidade menor de cloretos (984 mg/l) em relação ao campo de salinidade no gráfico com origem de intrusão marinha, pode indicar misturas de águas marinhas e águas lagunares à época em que os sedimentos se depositaram, dando origem a águas salobras. O poço JP818 demonstra um cenário diferente, já que sua concentração de cloretos não ultrapassa 10 mg/l, com uma razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  aproximada de 280, o que indica a baixa salinidade para este poço, representativo para outras porções do SAC.

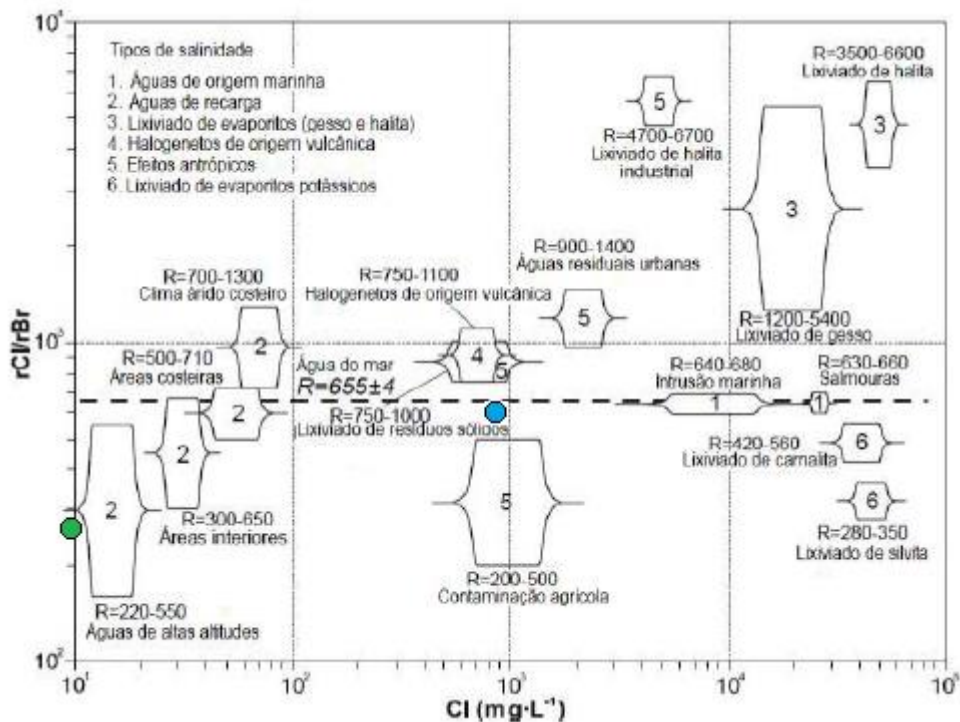


Figura 43. Gráfico com a razão molar entre Cl/Br versus a concentração de cloretos para seis tipos de salinidade em aquíferos da Espanha e Portugal, com os poços JP817 (ponto azul) e JP818 (ponto verde) (modificado de Alcalá & Custódio, 2004; Tradução de Sanches, 2016).

Para a razão  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ , como se observa, o poço JP818 por não apresentar anomalias, encontra-se dentro da faixa esperada para águas continentais com valor de 0,217, enquanto que o poço JP817 apresenta uma razão entre os intervalos de águas continentais e águas marinhas, porém com um valor de 13,05, o que pode representar uma certa influência de águas com maiores salinidades. Por fim, destaca-se também a baixa razão encontrada para  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  para o poço JP817, inferior à encontrada para águas marinhas, o que também reforça a razão encontrada para Cl/Br para este poço, indicando a presença de águas mais salinas durante a deposição dos sedimentos que compõem essa porção do SAC.

## 5 CONCLUSÕES

O município de Terra de Areia é integralmente abastecido por águas subterrâneas, a partir de poços do tipo ponteira, além de poços tubulares e comunitários. Os poços do tipo ponteira captam águas integralmente do SAC, enquanto que os poços tubulares da CORSAN captam águas do Sistema Aquífero Guarani, Sistema Aquífero Costeiro e por vezes do Sistema Aquífero Serra Geral, além de poços de pequeno diâmetro captarem águas do SAG e SASG na região extremo-oeste do município.

O SAG é representado unicamente pela Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, já que nenhum poço capta águas de unidades subjacentes. A partir das análises estatísticas dos poços que captam o SAG se observou que apresentam em média 200 m de profundidade, podendo atingir até 253 m perfurados, enquanto que o nível estático

apresenta uma média de 24,5 m e no máximo 59 m. A vazão em média apresenta valores de 14 m<sup>3</sup>/h, com no máximo 30 m<sup>3</sup>/h, além da capacidade específica que na média apresenta 0,21 m<sup>3</sup>/h/m e valores máximos de 0,53 m<sup>3</sup>/h/m.

Os poços que captam o SAG apresentaram em grande parte águas bicarbonatadas sódicas, além de que apresentam em média 300 µS/cm para condutividade elétrica e 188 mg/l para sólidos totais dissolvidos. Os poços apresentam um pH integralmente básico com uma média de 7,8. Por fim, destaca-se que alguns poços do SAG apresentaram águas quimicamente destoantes, classificadas majoritariamente como cloretadas sódicas, onde foram observadas anomalias de STD, com média de 1900 mg/l, CE, com média de 2900 µS/cm, além de cloretos e outros parâmetros com altos valores observados. Estes poços, pelas diferenças físico-químicas encontradas, estão associados a uma provável influência do SAC no SAG.

As águas do SAG apresentaram média qualidade para irrigação e boa qualidade para consumo humano, já que quando comparados os poços que captam águas do aquífero com os VMPs da portaria n°888 de consolidação não foram observados parâmetros que ultrapassam os valores estipulados pela portaria, enquanto que para irrigação, as águas apresentaram baixo a médio risco para salinização e baixo risco para sódio. No entanto, os poços que apresentaram misturas de águas com o SAC, apresentaram baixa a muito baixa qualidade para irrigação, já que existem poços com risco alto a excepcionalmente alto para salinização, e um risco baixo a médio para sódio. Quanto à potabilidade, alguns parâmetros encontraram-se acima dos valores indicados pela portaria, como dureza, sólidos totais dissolvidos, cloretos, manganês, sódio e sulfato.

O SAC na região é representado pelas unidades hidroestratigráficas 1 e 2, e, como grande parte do aquífero é captado por poços ponteira que atingem em média 20 m de profundidade e no máximo 37 m, é provável que a unidade hidroestratigráfica seja raramente captada já que se situa abaixo dos 25 m à medida que se aproxima da região oeste dos depósitos da planície costeira. Além dos poços ponteira, dois poços de monitoramento da rede RIMAS captam águas exclusivamente do SAC, com profundidades que atingem até 67 m.

As águas do SAC foram classificadas como cloretadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas, de modo que em média apresentaram valores de 240 µS/cm e no máximo 2825 µS/cm para CE, assim como para os STD, que em média apresentaram valores de 139 mg/l e no máximo 1883 mg/l. O pH apresentou valores característicos para um aquífero livre, com águas mais ácidas em relação ao SAG, ao apresentar em média um valor de 5,43.

Referente à qualidade da água para o SAC, é bastante variável, já que depende da porção do SAC em que as águas são captadas. Para as águas captadas em sedimentos de origem lagunar, as águas tendem a apresentar uma baixa qualidade, principalmente pela alta salinidade e também a presença de cloretos, já que alguns poços

tanto do tipo ponteira quanto tubulares, apresentaram valores acima dos VMPs para STD, cloretos, ferro e manganês. Enquanto que para os poços ponteira que captam águas dos sedimentos eólicos da barreira III apresentam uma boa qualidade para as águas em relação à potabilidade.

Os poços de ambos os aquíferos apresentaram anomalias de cloretos, que por vezes ultrapassaram os VMPs estabelecidos pela legislação. A ocorrência de cloretos no SAC é caracterizada como de origem natural, a partir das razões iônicas estabelecidas entre determinados parâmetros e o ânion cloreto. O ambiente de deposição associado aos sedimentos lagunares com ambientes pantanosos e de banhados, caracterizando águas salobras, o que indica a maior salinidade e por consequência a maior ocorrência de cloretos neste aquífero. Portanto, as águas de menor qualidade encontradas no SAC também têm influência sobre o SAG onde determinados poços apresentam entradas d'água em sedimentos lagunares, ou ainda uma maior espessura da camada de sedimentos.

Por fim, destaca-se a necessidade de um estudo mais aprofundado, atrelado à compartimentação e distribuição do SAC na região de Terra de Areia, dada a complexidade dos depósitos dos Sistemas Laguna-Barreira III e IV presentes na região. Assim como uma pesquisa mais aprofundada relacionada às interações hidrogeológicas, hidrodinâmicas e hidroquímicas, presentes entre os aquíferos.

## REFERÊNCIAS

ALCALÁ, Francisco J.; CUSTODIO, Emilio. **Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal**. Journal of Hydrology, v. 359, n. 1-2, p. 189-207, 2008.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Public health goals for nitrate and nitrite in drinking Water**. p. 2-6. 1997.

AURELIA, Annkarin et al. **<sup>14</sup>C analyses of groundwater from the Botucatu aquifer system in Brazil**. Radiocarbon, v. 31, n. 3, p. 926-933, 1989.

BARBOZA, Eduardo Guimaraes et al. **Sistemas deposicionais e evolução geológica da planície costeira entre La Coronilla e Cabo de Santa Marta (Bacia de Pelotas): uma revisão**. Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2021. p. 455-468, 2021.

BELLIENI, G. et al. **High-and low-TiO<sub>2</sub> flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin**. Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen, v. 150, n. 3, p. 273-306, 1984.

BONOTTO, D. M. **Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil**. Journal of Hydrology, v. 323, n. 1, p. 353–386, 30 maio 2006.

BRASIL, ANA Atlas. **Abastecimento Urbano de Água**. Brasília: ANA, 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021**. Brasília, 2021.

CALLIARI, Lauro Julio; KLEIN, Antonio Henrique. **Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS**. Pesquisas em geociências, v. 20, n. 1, p. 45-56, 1993.

**CENSO**, I. B. G. E. Disponível em:< [http://www. Censo. 2010. ibge. gov. br/](http://www.Censo.2010.ibge.gov.br/)>. v. 23, 2010. Acesso em: 18 fev. 2022.

**CIDADES**, I. B. G. E. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2020. Acesso em: 18 fev. 2022.

**CIDADES**, I. B. G. E. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2021. Acesso em: 18 fev. 2022.

COLLISCHONN, Luísa. **Gênese e ocorrência da camada aquífera" Sal Grosso" no litoral norte do Rio Grande do Sul**. 2018.

CONAMA –Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 396, de 03 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Brasília, 2008.

COSTA FILHO, Waldir Duarte et al. **Estudo da qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife**. Águas Subterrâneas, 1998.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Ministério de Minas e Energia, escala 1:750.000. 2008.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial, escala 1:750.000. 2005.

DA SILVA, Fernanda Guilardi; DOS SANTOS SCHERER, Claiton Marlon. **Morphological characterization of ancient aeolian dunes using the ground-penetrating radar, Botucatu Formation, Southern Brazil**. Brazilian Journal of Geology, v. 30, n. 3, p. 531-534, 2000.

DA SILVA, R. F. *et al.* **Avaliação do risco de contaminação por cloreto, nitrato e nitrito em águas subterrâneas da região do terceiro distrito de Duque de Caxias**. 53º Congresso Brasileiro de Química. Rio de Janeiro. 2013.



DAVIS, Stanley N.; WHITTEMORE, Donald O.; FABRYKA-MARTIN, June. **Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water**. *Groundwater*, v. 36, n. 2, p. 338-350, 1998.

DILLENBURG, Sergio R.; BARBOZA, Eduardo G. **The strike-fed sandy coast of Southern Brazil**. Geological Society, London, Special Publications, v. 388, n. 1, p. 333-352, 2014.

DINIZ, João Alberto Oliveira et al. **Manual de cartografia hidrogeológica**. CPRM, 2014.

FABRICIO, João Aécio Corrêa. **Projeto Carvão Gravataí/Torres**. 1980.

FERNANDES, A. J. et al. **Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guarani**. *Boletín Geológico y Minero*, v. 123, n. 3, p. 325-339, 2012.

FETTER, C.W., 1994. **Applied Hydrogeology**, Third ed. Prentice Hall Publication.

FILIZOLA, Heloisa Ferreira et al. **Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guairá**. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 37, n. 5, p. 659-667, 2002.

FRANCISCHINI, H. et al. **Dinosaur Ichnofauna of the upper Jurassic/lower Cretaceous of the Paraná basin (Brazil and Uruguay)**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 63, p. 180-190, 2015.

FREEMAN, James T. **The use of bromide and chloride mass ratios to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwaters of the Western Canadian Sedimentary Basin**. *Hydrogeology Journal*, v. 15, n. 7, p. 1377-1385, 2007.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Groundwater**. 1979.

GAMBOA, Luiz Antonio Pierantoni; RABINOWITZ, Philip D. **The Rio Grande fracture zone in the western South Atlantic and its tectonic implications**. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 52, n. 2, p. 410-418, 1981.

GHIGNONE, J. I. **Reconhecimento gravi-magnético na Bacia de Pelotas**. *Boletim Técnico Petrobras*, v. 3, n. 2, p. 73-79, 1960.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**. *Acta Geologica Leopoldensia. Série Mapas*, 2., 1995.

HAUSMAN, A. **Estudos das possibilidades de água subterrânea no RS**. *Bol. Soc. Brás. Geol. RJ*, v. 9, n. 1, p. 29-42, 1960.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**, I Semana Hidrogeológica Uruguaia. 1964.

HOWARD, Ken WF; HAYNES, Janet. **Groundwater contamination due to road de-icing chemicals—salt balance implications**. Geoscience Canada, 1993.

IMBRIE, John et al. **The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine d18O record**. 1984.

JALALI, Mohsen. **Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran**. Environmental Geology, v. 51, n. 3, p. 433-446, 2006.

KATZ, Brian G.; EBERTS, Sandra M.; KAUFFMAN, Leon J. **Using Cl/Br ratios and other indicators to assess potential impacts on groundwater quality from septic systems: a review and examples from principal aquifers in the United States**. Journal of Hydrology, v. 397, n. 3-4, p. 151-166, 2011.

KELLY, Walt; PANNO, Sam; HACKLEY, Keith. **The sources, distribution, and trends of chloride in waters of Illinois**. Bulletin (Illinois State Water Survey) no. 74, 2012.

LEONARDI, Giuseppe; CARVALHO, I. dS; FERNANDES, Marcelo Adorna. **The desert ichnofauna from Botucatu Formation (Upper Jurassic-Lower Cretaceous), Brazil**. Paleontologia: cenários de vida, v. 1, p. 371-383, 2007.

LISBOA, Nelson Amoretti et al. **Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul**. Águas Subterrâneas, 2004.

Lopes R.P., Kinoshita A., Baffa O., Figueiredo A.M.G., Dillenburg S.R., Schultz C.L., Pereira J.C. 2014. **ESR dating of Pleistocene mammals & marine shells from the coastal plain of Rio Grande do Sul state, southern Brazil**. Quaternary International, 352:124-134, doi:10.1016/j.quaint.2013.07.020.

Lopes R.P., Oliveira L.C., Figueiredo A.M.G., Kinoshita A., Baffa O., Buchmann F.S. 2010. **ESR dating of Pleistocene mammal teeth & its implications for the biostratigraphy & geological evolution of the coastal plain, Rio Grande do Sul, southern Brazil**. Quaternary International, 212(1):213-222, doi:10.1016/j.quaint.2009.09.018.

MACHADO, José Luiz Flores. **Comparação entre o Sistema Aquífero Guarani (SAG) em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul**. 2016.

MACHADO, José Luiz Flores. **Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do sistema aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. 2005. Tese de Doutorado.

MACHADO, José Luiz Flores; FREITAS, Marcos Alexandre de. **Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. 2005.

MATOS, Alex Bortolon de. **Compartimentação estrutural e interações hidrogeológicas entre o Sistema Aquífero Guarani e Serra Geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** 2020.

MELFI, Adolpho. et al. **Petrogenetic aspects of continental flood basalt-rhyolite suites from the Paraná Basin (Brazil).** In: Abstracts. 1988. p. 91-92.

MILANI, Edison J. et al. **Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná.** Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.

MILANI, Edison José et al. **Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas.** Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15, n. 2, p. 183-205, 2007.

NAILY, Wilda et al. **Cl/Br ratio to determine groundwater quality.** In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018. p. 012020.

NAIR, Indu S.; PARIMALA RENGANAYAKI, S.; ELANGO, L. **Identification of seawater intrusion by Cl/Br ratio and mitigation through managed aquifer recharge in aquifers North of Chennai, India.** J. Groundw. Res, v. 2, n. 155162, p. 19, 2013.

PAIM, Rosana Alves. **Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços ponteira no município de Osório, RS.** 2018.

PEATE, David W.; HAWKESWORTH, Chris J.; MANTOVANI, Marta SM. **Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution.** Bulletin of Volcanology, v. 55, p. 119-139, 1992.

REBOUÇAS, A. C., 1976, **Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná Análise de pré-viabilidade.** Tese de Livre Docência Universidade de São Paulo 143 p.

REBOUÇAS, Aldo C.; AMORE, Luiz. **O Sistema Aquífero Guarani-SAG.** Águas subterrâneas:(São Paulo), v. 16, n. 1, p. 1-9, 2002.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe et al. **Água subterrânea utilizada para irrigação na planície costeira do Rio Grande Do Sul e seu risco a salinização.** Águas Subterrâneas, 2009.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe et al. **Poços como vetores de contaminação: o caso dos aquíferos da planície costeira do Rio Grande Do Sul.** Águas Subterrâneas, 2008.

REGINATO, Pedro Antonio Roehe; AHLERT, Siclério; SCHNEIDER, Vania Elisabete. **Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul.** Águas Subterrâneas, v. 27, n. 1, 2013.

ROSA, Maria Luiza Correa da Camara 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, v. 47, p. 183-207, 2017.

SALGUEIRO, Mário A. **Sobre a poluição bacteriológica e contaminação de águas.** Arquipélago. Série Ciências da Natureza, v. 2, p. 177-194, 1981.

SANCHES, Nizara Ratiere dos Santos et al. **Aspectos hidroquímicos das águas subterrâneas exploradas no município de Itaboraí-RJ.** 2016.

SANTOS. **Noções de Hidroquímica.** In FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, 2000, p. 81-102.

SCHERER, Claiton MS. **Análise estratigráfica e litofaciológica da formação Botucatu (Neocomiano) no Estado do Rio Grande do Sul.** Curso de Pós-Graduação em Geociências. 208p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SCHERER, Claiton MS. **Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil.** Sedimentology, v. 49, n. 1, p. 97-116, 2002.

SEMA. Secretaria do meio Ambiente e Infraestrutura. **Diagnóstico e prognóstico das demandas hídricas da bacia hidrográfica do rio Tramandaí, Relatório Temático A.3.** Porto Alegre, 2005.

SENA, Shirley Feitosa Machado. **Estudos hidroquímicos da água produzida de um determinado campo de petróleo da bacia potiguar.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011.

SOARES, Ana Paula et al. **Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani.** Geociências, v. 26, n. 4, p. 297-311, 2007.

TEIXEIRA, Guilherme Vargas. **Estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral e sua relação com aquíferos sedimentares no Rio Grande do Sul.** 2020.

TEIXEIRA, Guilherme Vargas; VIERO, Antonio Pedro. **Evolução hidrogeoquímica dos aquíferos mesozoicos da porção sul da bacia do Paraná no oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Águas subterrâneas, v. 31, n. 1, p. 36, 2017.

THIEDE, David & VASCONCELOS, Paulo. (2010). **Parana flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results**. *Geology*. 38. 747-750. 10.1130/G30919.1.

TOMAZELLI, Luiz J. et al. **Caracterização de um depósito praial pleistocênico na Província Costeira do Rio Grande do Sul**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 1982. p. 1514-1523.

TOMAZELLI, Luiz J.; DILLENBURG, Sérgio R. **Sedimentary facies and stratigraphy of a last interglacial coastal barrier in south Brazil**. *Marine Geology*, v. 244, n. 1-4, p. 33-45, 2007.

TOMAZELLI, Luiz J.; DILLENBURG, Sérgio R.; VILLWOCK, Jorge Alberto. **Late Quaternary Geological History of Rio Grande do Sul Coastal Plain, Southern Brazil**. *Brazilian Journal of Geology*, v. 30, n. 3, p. 474-476, 2000.

TOMAZELLI, Luiz J., VILLWOCK, Jorge. A. **O Cenozóico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira**. In: Holz M., De Ros L.F. (eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Edições CIGO/UFRGS, p. 375-406, 2000.

TOMAZELLI, LUIZ; VILLWOCK, JORGE. **Geologia do sistema lagunar holocênico do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. *Pesquisas em Geociências*, v. 18, n. 1, p. 13-24, 1991.

TROIAN, Guilherme Casarotto et al. **Modelo conceitual hidroestratigráfico do sistema aquífero costeiro no litoral norte do Estado do Rio Grande Do Sul**. *Revista águas subterrâneas*. Vol. 34, n. 3 (set. 2020), p. 264-274, 2020.

TROIAN, Guilherme Casarotto; GOFFERMANN, Marcelo; DE FREITAS, Marcos Alexandre. **Monitoramento quali-quantitativo do aquífero costeiro no litoral norte do estado do Rio Grande Do Sul**. *Águas Subterrâneas*, 2014.

URIEN, Carlos M.; MARTINS, Luiz R.; LORENZETTI, L. A. **Structural and Physiographic Map of Eastern South America and Western South Atlantic**. CECO, Universidad Federal Rio Grande do Sul, 1978.

VILLWOCK, J. A. et al. **Concentraciones de arenas negras a lo largo de la costa de Rio Grande do Sul, Brasil**. *Memórias, Seminário sobre ecologia bentônica y sedimentación de la plataforma continental Del Atlântico Sur*, Montevideu, Uruguai, p. 405-414, 1979.

VILLWOCK, Jorge Alberto et al. **Recursos minerais da região costeira e aspectos metodológicos da prospecção**. Acta Geológica Leopoldensia, v. 22, n. 10, p. 83-110, 1986.