



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

ALEX BORTOLON DE MATOS

**COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL E INTERAÇÕES
HIDROGEOLÓGICAS ENTRE O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI E SERRA
GERAL NA REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

PORTO ALEGRE

2020

ALEX BORTOLON DE MATOS

**COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL E INTERAÇÕES
HIDROGEOLÓGICAS ENTRE O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI E SERRA
GERAL NA REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do grau de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

PORTO ALEGRE

2020

Bortolon de Matos, Alex
COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL E INTERAÇÕES
HIDROGEOLOGICAS ENTRE O SISTEMA AQUIFERO GUARANI E
SERRA GERAL NA REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE
DO SUL / Alex Bortolon de Matos. -- 2020.
197 f.
Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Compartimentação Estrutural. 2. Interações
Hidrogeológicas. 3. Sistema Aquífero Guarani. 4.
Sistema Aquífero Serra Geral. 5. Modelo Conceitual de
Circulação de Água. I. Antonio Roehe Reginato, Pedro,
orient. II. Título.

ALEX BORTOLON DE MATOS

**COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL E INTERAÇÕES
HIDROGEOLÓGICAS ENTRE O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI E SERRA
GERAL NA REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do grau de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em: Porto Alegre, 09 de janeiro de 2020.

Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato – IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin – UCS
Examinador

Prof^a. Dra. Franciéle Schwanck Carlos – IPH/UFRGS
Examinadora

Prof. Dr. Antonio Pedro Viero – IGEO/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa – UFRGS
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UFRR por conceder a oportunidade de desenvolver meus estudos em um centro de excelência como o PPGRHSA-IPH da UFRGS, ao CNPq pela concessão da bolsa de pesquisa, e à CAPES (PROEX) pelo financiamento das análises isotópicas e hidroquímicas.

Agradeço ao professor Pedro Reginato, que nesses quatro anos como meu orientador e amigo, me ajudou em todas as etapas desta pesquisa, repassando todo o conhecimento necessário, não só para a obtenção dos resultados deste trabalho, mas também para que eu me tornasse um pesquisador cada vez melhor.

Agradeço aos professores Gustavo Athayde e Marcos Leão, que me apoiaram e me deram ideias que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Marty Frisbee que me recebeu na Purdue University, e com seu conhecimento me ajudou a compreender os processos hidroquímicos e isotópicos das águas dos aquíferos.

Agradeço às empresas de perfuração por fornecer informações que foram muito importantes para esta pesquisa, em especial ao senhor Mauro e a senhora Andressa, que tiveram muita paciência e disponibilidade para conversar, repassando todos os seus conhecimentos sobre essa região. Agradeço aos proprietários dos poços por serem sempre bem receptivos e permitirem a coleta das águas.

Agradeço aos amigos de longa data, aos que fiz em Porto Alegre e nos EUA, que sempre me apoiaram e ajudaram em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Odeny e Maristela, e meus irmãos Júnior, André e Nery, por estarem sempre presentes na minha vida, me apoiando em todos os momentos. Às minhas avós, Otilia e Marieta, que me viram crescer como pessoa e profissionalmente, mas que infelizmente não puderam estar presentes neste momento.

Agradeço especialmente à minha esposa Mariana, por ter muita paciência, e estar sempre presente, apoiando e incentivando, durante todo esse percurso, sem o qual toda a dedicação a este trabalho não seria possível.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo identificar a compartimentação estrutural e a ocorrência de interações hidrogeológicas, entre os Sistemas Aquíferos Guarani (SAG) e Serra Geral (SASG). Para tanto, a área de estudo, que envolve a região nordeste do RS, foi subdividida em duas partes, a Área do Planalto e a Área da Escarpa. Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados estruturais, morfoestruturais, geológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos, do SAG e do SASG na região. Dessa forma, observou-se que na Área da Escarpa o SAG se apresenta compartimentado por 3 grandes estruturas, encaixadas nos Vales do Rio Caí, Rio Taquari e Rio dos Sinos. Nessa área, o fluxo segue dos altos potenciométricos, que coincidem com as porções mais elevadas da região, em direção aos grandes rios, que funcionam como zonas de descarga, e que coincidem com os locais onde foram encontradas as maiores capacidades específicas. Já na Área do Planalto observou-se uma maior atuação estrutural, tanto sobre o topo do SAG, quanto na potenciometria. Com base nestes dois parâmetros, foi possível identificar as principais estruturas que atuam na compartimentação do SAG nessa região, com orientações principais N30W e N60E, e secundárias N50W, N40-50E e E-W, possuindo relação com os grandes sistemas de falhas observadas por outros autores, e que podem permitir a conexão entre os aquíferos. Baseado nas características hidroquímicas do SAG foi possível identificar a individualização de 4 grupos hidroquímicos, com destaque para dois grupos com águas típicas do SAG de alto confinamento, classificadas como sulfatadas ou cloretadas sódicas, e que podem ter influência de águas do pré-SAG, apresentando como principais marcadores os valores elevados de sódio, cloreto, sulfato, fluoreto e condutividade elétrica. A utilização desses marcadores do SAG, aliado a uma potenciometria favorável desse sistema aquífero, e a existência de estruturas de conexão, possibilitou a identificação de dois grupos hidroquímicos do SASG onde ocorrem as interações, com águas que variam de bicarbonatadas sódicas à sulfatadas ou cloretadas sódicas. O modelo conceitual proposto demonstrou a existência de uma significativa influência da geomorfologia e das estruturas sobre os processos de misturas, com as áreas onde os vales são mais aplainados, permitindo uma maior recarga das fraturas do SASG, ao contrário do que ocorre em vales mais fechados, onde a hidroquímica mostra uma influência muito maior das águas do SAG, e onde foram observadas concentrações de elementos em patamares superiores aos recomendados para a potabilidade das águas.

ABSTRACT

The present study had as main objective to identify the structural compartmentation and the occurrence of hydrogeological interactions between the Guarani (GAS) and Serra Geral (SGAS) aquifer systems. For this, the study area which involves the northeastern region of RS was subdivided into two parts, the Planalto Area and the Escarpa Area. For the development of this work was used the structural, morphostructural, geological, hydrogeological, hydrochemical and isotopic data from the GAS and SGAS in the region. In this way, it was observed that in the Escarpa Area the GAS is compartmentalized by three large structures located in the Caí, Taquari and Sinos rivers valleys. In this region, the water flows from the areas with high potentiometry which coincide with the topographically higher portions of the region towards the large rivers which function as discharge zones and where the highest specific capacities were found. In the Planalto Area, a greater structural influence was observed, both on the top of the GAS and on the potentiometry. Based on these two parameters it was possible to identify the main structures that work in the compartmentalization of the GAS in this region with main orientations N30W and N60E, and secondary N50W, N40-50E and EW, related to large fault systems observed by other authors and that may allow the connection between the aquifers. Based on the hydrochemical characteristics of the GAS it was possible to identify the individualization of four hydrochemical groups, highlighting two groups with a typical high-confinement GAS waters that were classified as sodium sulfated or chlorinated and which may have influence from pre-GAS waters, presenting as main markers high values of sodium, chloride, sulfate, fluoride and electrical conductivity. Using these markers from GAS waters combined with a favorable potentiometry of this aquifer system and the existence of connecting structures it was possible to identify two SGAS hydrochemical groups where the interactions occur with waters that ranges from sodium bicarbonate to sodium sulfated or chlorinated. The proposed conceptual model demonstrated the existence of a significant influence of the geomorphology and the structures on the mixing waters processes with the areas where the valleys are flatter allowing a greater recharge of the SGAS fractures as opposed to what occurs in deeper valleys where hydrochemistry shows a much greater influence of the GAS waters and where the concentrations of elements were observed at levels higher than those recommended for water potability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Área de estudo com os principais cursos d'água e cidades da região. _____	18
Figura 2 - Abrangência da Província do Paraná em sua porção brasileira. _____	21
Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. _____	22
Figura 4 - Principais Formações geológicas presentes na área de estudo. _____	23
Figura 5 - Seção geológica esquemática de um derrame. _____	24
Figura 6 - Domínios Geomorfológicos do RS, com destaque para a área de estudo. _____	27
Figura 7 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná, com destaque para as principais estruturas na região NERS: 14-Sinclinal de Torres; 22-Zona de Falha Blumenau/Soledade; 23-Falha do Leão; 29-Lineamento de Bento Gonçalves. _____	29
Figura 8 - Localização do SFTA-P e SFDC na área de estudo. _____	30
Figura 9 - Principais sistemas de falhas no RS. _____	31
Figura 10 - Localização dos lineamentos LRA e LRF. _____	32
Figura 11 - Arcabouço hidroestratigráfico do SAG no RS. _____	35
Figura 12 - Estruturação hidroestratigráfica esquemática dos diferentes setores do SAG no sul da Bacia do Paraná. _____	36
Figura 13 - Variação da espessura do SAG na Bacia do Paraná. _____	37
Figura 14 - Mapa potenciométrico do SAG com destaque para a região NERS. _____	39
Figura 15 - Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral no RS. _____	42
Figura 16 - Divisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Serra Geral no RS. _____	43
Figura 17 - Fácies hidroquímicas do SASG identificada no RS. _____	52
Figura 18 - Diagrama para as razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para água do SAG e SASG na região do Alto Rio Uruguai. _____	55
Figura 19 - Representação em 3D do mapa de contorno estrutural do topo da Formação Botucatu. _____	57
Figura 20 - Compartimentação estratigráfica do SAG na área de afloramento no RS. _____	59
Figura 21 - Individualização de compartimentos baseada na hidroquímica e na termometria. _____	59
Figura 22 - Compartimentos estruturais do SAG no estado do RS. _____	61
Figura 23 - Seção geológica esquemática ilustrando o efeito do SFDC sobre o SAG. _____	62
Figura 24 - Fluxograma com a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa. _____	64
Figura 25 - Subdivisão da área de estudo em Área da Escarpa e Área do Planalto. _____	65
Figura 26 - Esquema para definição do posicionamento do topo do SAG. _____	69
Figura 27 - Esquema utilizado na definição da potencimetria favorável do SAG. _____	74
Figura 28 - Ponto de coleta de amostra de água. _____	75
Figura 29 - Recipientes utilizados no armazenamento das amostras hidroquímicas. _____	76
Figura 30 - Sonda utilizada na medição dos parâmetros em campo. _____	76

Figura 31 - Recipientes utilizados no armazenamento das amostras isotópicas. _____	77
Figura 32 - Localização dos poços utilizados no estudo. _____	80
Figura 33 - Localização dos poços da Área da Escarpa. _____	81
Figura 34 - Mapa de lineamentos identificados na escala 1:250.000. _____	82
Figura 35 - Mapa de lineamentos identificados na escala 1:1.000.000. _____	82
Figura 36 - Arcabouço morfoestrutural e delimitação dos compartimentos. _____	83
Figura 37 - Cota do topo do SAG na Área da Escarpa, em m.s.n.m. _____	84
Figura 38 - Relação entre a cota do topo do SAG e o relevo da região. _____	84
Figura 39 - Mapa de superfície potenciométrica, em m.s.n.m. _____	86
Figura 40 - Relação entre a cota do topo do SAG e a carga hidráulica. _____	86
Figura 41 - Relação entre as bacias hidrográficas e a carga hidráulica, em m.s.n.m. _____	87
Figura 42 - Relação entre as produtividades dos poços e as cargas hidráulicas. _____	88
Figura 43 - Distribuição das classes hidroquímicas na Área da Escarpa. _____	89
Figura 44 - Poços utilizados na elaboração da transecta T1. _____	90
Figura 45 - Perfil representativo do modelo hidrogeológico conceitual para a Área da Escarpa. _____	91
Figura 46 - Localização dos poços utilizados nas análises para a Área do Planalto. _____	92
Figura 47 - Lineamentos traçados para a escala 1:1.000.000 e seu diagrama de rosetas. _____	93
Figura 48 - Lineamentos traçados para a escala 1:250.000 e seu diagrama de rosetas. _____	94
Figura 49 - Traçado representando os lineamentos de 1:1.000.000, e as falhas e sistemas de falhas identificadas por outros autores para a região. _____	95
Figura 50 - Mapa de densidade de lineamentos para a escala 1:1.000.000. _____	96
Figura 51 - Mapa de densidade de lineamentos para a escala 1:250.000. _____	96
Figura 52 - Relação entre o topo do SAG e a cota do terreno. _____	97
Figura 53 - Relação entre o topo do SAG e a espessura das rochas vulcânicas. _____	97
Figura 54 - Variação do topo do SAG na Área do Planalto, com os cursos d'água sendo representados em vermelho. _____	98
Figura 55 - Relação entre a espessura das rochas vulcânicas e a cota do terreno. _____	100
Figura 56 - Distribuição da espessura das rochas vulcânicas, em metros. _____	100
Figura 57 - Espessura das rochas vulcânicas, em metros, sobre o mapa geológico do RS. ____	101
Figura 58 - Cota do topo do SAG, em m.s.n.m., sobre o mapa geológico do RS. _____	102
Figura 59 - Mapa de distribuição dos poços do SASG com relação ao número de EA. ____	103
Figura 60 - Mapa de distribuição das profundidades das entradas de água. _____	104
Figura 61 - Mapa de distribuição das potenciométrias dos poços do SASG, em m.s.n.m. ____	105
Figura 62 - Mapa de distribuição das capacidades específicas (qs) do SASG. _____	106
Figura 63 - Mapa de distribuição das vazões (Q) do SASG. _____	106
Figura 64 - Relação entre as capacidades específicas e o número de EA. _____	107

Figura 65 - Relação entre a capacidades específicas e a profundidade das EA. _____	107
Figura 66 - Mapa potenciométrico do SAG, sem contribuição das fraturas. _____	109
Figura 67 - Mapa potenciométrico do SAG, com possibilidade de contribuição. _____	109
Figura 68 - Mapa de distribuição das capacidades específicas (qs) do SAG, em m ³ /h.m. ____	111
Figura 69 - Mapa de distribuição das vazões (Q) do SAG, em m ³ /h. _____	111
Figura 70 - Relação entre o Erro Prático Iônico e a condutividade elétrica. _____	112
Figura 71 - Diagrama de Piper para as águas do SAG. _____	113
Figura 72 - Distribuição dos grupos hidroquímicos do SAG. _____	113
Figura 73 - Dendrograma de agrupamento dos poços do SAG. _____	115
Figura 74 - Distribuição dos agrupamentos hidroquímicos do SAG. _____	116
Figura 75 - Relação entre os grupos de águas do SAG e os scores para as duas componentes principais _____	118
Figura 76 - Relação entre o grau de confinamento e a temperatura das águas do SAG. ____	118
Figura 77 - Distribuição das temperaturas das águas dos poços do SAG. _____	119
Figura 78 - Diagrama de Piper para as águas do SASG. _____	120
Figura 79 - Distribuição dos grupos hidroquímicos do SASG. _____	121
Figura 80 - Gráfico representativo dos escores das duas componentes principais. _____	123
Figura 81 - Distribuição dos agrupamentos hidroquímicos do SASG. _____	124
Figura 82 - Dendrograma de agrupamento dos poços do SASG. _____	125
Figura 83 – Diagramas binários para os parâmetros do SASG. _____	127
Figura 84 - Relação entre os grupos de águas do SASG e os scores para as duas componentes principais. _____	128
Figura 85 - Relação entre a cota de referência e a temperatura das águas do SASG. ____	128
Figura 86 - Localização dos poços do SAG e SASG das análises isotópicas. _____	130
Figura 87 - Relações entre as razões isotópicas e as retas meteóricas. _____	130
Figura 88 - Relações entre as características do SASG e as razões isotópicas. _____	132
Figura 89 - Localização dos pontos visitados, com destaque para os citados no trabalho. ____	134
Figura 90 - (a) basalto intemperizado com presença de amígdalas (ponto 34) (b) arenito (ponto 35). Escala representativa: martelo com 40cm. _____	135
Figura 91 - (a) arenito fraturado no ponto 1 (b) arenito fraturado no ponto 10 (c) basalto fraturado no ponto 2 (d) basalto fraturado no ponto 12. Escala representativa: caneta em (a) com 15cm, escala em (b) e (c) com 8cm, e martelo em (d) com 40cm. _____	135
Figura 92 - Intrusão de diabásio no ponto 19. Escala representativa: martelo com 40cm. ____	136
Figura 93 - Principais estruturas que atuam sobre a cota do topo do SAG, com os cursos d'água destacados em vermelho. _____	137
Figura 94 - Estruturas que atuam regionalmente sobre o topo do SAG. _____	139

Figura 95 - Principais estruturas que atuam sobre a potenciometria do SAG, com os cursos d'água destacados em vermelho. _____	140
Figura 96 - Estruturas que atuam regionalmente sobre a potenciometria do SAG. _____	141
Figura 97 - Principais estruturas com atuação local sobre o SAG. _____	142
Figura 98 - Perfis representativos da região norte da área de estudo. _____	143
Figura 99 - Perfis representativos da região do Vale do Rio das Antas. _____	146
Figura 100 - Perfis representativos da região central da área de estudo. _____	149
Figura 101 - Perfis representativos da região sul da área de estudo. _____	151
Figura 102 - Perfis representativos da região do Vale do Rio Taquari. _____	153
Figura 103 - Principais estruturas que atuam na compartimentação SAG na Área do Planalto. _____	154
Figura 104 - Relação entre o arcabouço estrutural e outras estruturas regionais. _____	155
Figura 105 - Distribuição dos poços do SASG sob potenciometria favorável do SAG, com destaque para as estruturas que atuam na compartimentação do SAG. _____	157
Figura 106 - Relação entre os principais parâmetros físico-químicos e os agrupamentos. ____	158
Figura 107 - Distribuição dos poços com potenciometria favorável e do poço S479. _____	160
Figura 108 - Distribuição dos locais onde ocorre a interação entre as águas, com as áreas de separação dos dois conjuntos de poços. _____	162
Figura 109 - Áreas de influência de interações. _____	164
Figura 110 - Localização dos poços com e sem anomalias na área de influência de interações. _____	165
Figura 111 - Seção representativa da área de interações A1. _____	167
Figura 112 - Seção representativa da área de interações A2. _____	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de detecção para os parâmetros hidroquímicos. _____	76
Tabela 2 - Estatística da cota do topo do SAG, em m.s.n.m. _____	83
Tabela 3 - Estatística da espessura das rochas vulcânicas. _____	85
Tabela 4 - Estatística das capacidades específicas, em m ³ /h/m. _____	88
Tabela 5 - Estatística dos comprimentos dos lineamentos, em metros. _____	93
Tabela 6 - Estatística para o topo do SAG para a Área do Planalto. _____	98
Tabela 7 – Estatística das entradas de águas dos poços do SASG. _____	103
Tabela 8 - Profundidade das entradas de água mais profundas dos poços do SASG. _____	104
Tabela 9 - Estatística das entradas de água mais profundas dos poços do SASG. _____	104
Tabela 10 – Principais estatísticas para as vazões e capacidades específicas do SASG. _____	107
Tabela 11 - Variância Total Explicada das águas do SAG. _____	114
Tabela 12. Matriz dos Componentes das águas do SAG. _____	115
Tabela 13. Variância Total Explicada das águas do SASG. _____	122
Tabela 14. Matriz dos Componentes das águas do SASG. _____	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca²⁺ (Ca) – Cálcio
CE – Condutividade Elétrica
Cl⁻ - Cl – Cloreto
CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
D – Deutério
Direção E-W – Direção Leste-Oeste
Direção NE – Direção Nordeste
Direção N-S – Direção Norte-Sul
Direção NW – Direção Noroeste
EA – Entrada de Água
F⁻ (F) – Fluoreto
h – Horas
HCO₃²⁻ (HCO₃) – Bicarbonato
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
K⁺ (K) – Potássio
km – Quilômetro
km² – Quilômetro Quadrado
LRCA – Lineamento Rio Carreiro
m – Metros
m² – Metros Quadrados
m³ – Metros Cúbicos
m³/h – Metros Cúbicos por Hora
m³/h/m – Metros Cúbicos por Hora por Metro
Ma – Milhões de Anos
MDE – Modelo Digital de Elevação
meq/L – Miliequivalente por Litro
Mg²⁺ (Mg) – Magnésio
mg/l – Miligrama por litro
mm – Milímetro
m.s.n.m – Metros Sobre o Nível do Mar
Na⁺ (Na) – Sódio

NE – Nível Estático
NERS – Nordeste do Rio Grande do Sul
PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S.A.
pH – Potencial Hidrogeniônico
r – Razão Iônica
RMM – Reta Meteórica Mundial
SAG – Sistema Aquífero Guarani
SASG – Sistema Aquífero Serra Geral
SDT – Sólidos dissolvidos Totais
SFDC – Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu
SFTA-P – Sistema de Falhas Terra de Areia – Posadas
SFJM – Sistema de Falhas Jaguari – Mata
SGF1 – Aquíferos Fraturados Associados a Estruturas Tectônicas
SGF2 – Aquíferos Fraturados Associados a Estruturas Primárias
SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SO₄²⁻ (SO₄) – Sulfato
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM – Universal Transversa de Mercator
VSMOW – Viena Standard Mean Ocean Water
°C – Grau Celsius
δ²H – Isótopo de Deutério
δ¹⁸O – Isótopo de Oxigênio
μS/cm – Micro-Siemens por Centímetro
‰ – Partes por Mil
% – por cento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Aspectos gerais	16
1.2. Área de estudo	17
1.3. Justificativa	19
2. OBJETIVO	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Contexto geológico regional	21
3.2. Geomorfologia da região NERS	26
3.3. Aspectos estruturais da Bacia do Paraná	28
3.4. Contexto hidrogeológico	33
3.4.1. Caracterização hidrogeológica do SAG	34
3.4.2. Caracterização hidrogeológica do SASG	41
3.5. Caracterização hidroquímica	46
3.5.1. Hidroquímica do SAG	47
3.5.2. Hidroquímica do SASG	49
3.5.3. Principais características isotópicas do SAG e do SASG	53
3.6. Compartimentação estrutural dos Sistemas Aquíferos	56
3.7. Considerações sobre a revisão bibliográfica	62
4. MATERIAL E MÉTODOS	64
4.1. Inventário e cadastro dos poços tubulares	66
4.2. Caracterização estrutural	67
4.3. Caracterização geológica	68
4.4. Caracterização hidrogeológica	70
4.5. Caracterização hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral	71
4.6. Identificação de interações entre o SAG e o SASG	73
4.7. Compartimentação estrutural	78
4.8. Elaboração do modelo conceitual de circulação de água entre o SAG e o SASG	78
4.9. Análises estatísticas e ferramentas gráficas	79

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1. Levantamento dos dados gerais	80
5.1.1. Inventário e avaliação das informações dos poços tubulares	80
5.1.2. Análise dos perfis geológicos dos poços tubulares	81
5.2. Estudo da compartimentação do SAG na Área da Escarpa	81
5.2.1. Arcabouço morfoestrutural	82
5.2.2. Variação da cota do topo do SAG e da espessura das rochas vulcânicas	83
5.2.3. Relação do fluxo de água subterrânea com a compartimentação	85
5.2.4. Relação da produtividade com a compartimentação	87
5.2.5. Relação da hidroquímica com a compartimentação	88
5.2.6. Modelo hidrogeológico conceitual para a Área da Escarpa	89
5.3. Estudo da Área do Planalto	92
5.3.1. Caracterização estrutural	92
5.3.2. Caracterização geológica	97
5.3.3. Caracterização hidrogeológica	102
5.3.3.1. Caracterização hidrogeológica do SASG	102
5.3.3.2. Caracterização hidrogeológica do SAG	108
5.3.4. Caracterização hidroquímica e isotópica do SAG e do SASG	112
5.3.4.1. Hidroquímica do SAG	112
5.3.4.2. Hidroquímica do SASG	119
5.3.4.3. Análise isotópica	129
5.3.5. Análise das estruturas que atuam na compartimentação do SAG	133
5.3.5.1. Levantamento de campo	133
5.3.5.2. Influência das estruturas na variação regional do topo do SAG	136
5.3.5.3. Influência das estruturas na variação regional da potenciometria do SAG	139
5.3.5.4. Atuação das estruturas na variação das características locais do SAG	142
5.3.5.5. Arcabouço estrutural do SAG na Área do Planalto	153
5.3.6. Interações hidrogeológicas entre o SAG e o SASG	156
5.3.6.1. Avaliação da existência de potenciometria favorável do SAG sobre o SASG	156
5.3.6.2. Análise da similaridade entre as águas do SAG e do SASG	158
5.3.6.3. Ocorrência de interações entre as águas do SAG e do SASG	159
5.4. Modelo conceitual de interações entre o SAG e o SASG	166
6. CONCLUSÕES	169

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	172
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
ANEXOS	185
Anexo A – Características dos poços do SAG da Área do Planalto.	186
Anexo B – Características dos poços do SASG da Área do Planalto.	189
Anexo C – Parâmetros físico-químicos do SAG da Área do Planalto.	192
Anexo D – Parâmetros físico-químicos do SASG da Área do Planalto.	193
Anexo E – Razões isotópicas para os poços do SAG e do SASG.	195

1. INTRODUÇÃO

A introdução consta de uma abordagem sobre os aspectos gerais dos recursos hídricos subterrâneos, bem como da localização da área de estudo e da justificativa para o desenvolvimento dessa pesquisa.

1.1. Aspectos gerais

Com a intensificação da degradação das águas superficiais, boa parte da população mundial hoje sofre com a escassez de água potável. As limitações impostas no uso dessas águas têm proporcionado nos últimos anos um aumento na utilização dos recursos hídricos subterrâneos, o que ocorre muitas vezes sem um devido planejamento.

Nesse contexto, existe a necessidade de se compreender melhor a dinâmica e o funcionamento dos aquíferos onde essas águas se encontram armazenadas, com o intuito de proporcionar a sua utilização de maneira racional, evitando problemas no futuro.

Na região nordeste do Rio Grande do Sul (NERS) há a ocorrência de dois grandes Sistemas Aquíferos, o Guarani (SAG) e o Serra Geral (SASG). O SAG é caracterizado por aquíferos granulares, variando de livre a confinado, que ocorrem associados a rochas sedimentares pertencentes a diferentes Unidades Hidroestratigráficas. Já o SASG é composto por aquíferos fraturados que ocorrem associados às estruturas tectônicas e de resfriamento das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, com a circulação da água ocorrendo ao longo dos diferentes tipos de estruturas (REGINATO, 2003; MACHADO, 2005a).

Em função disso, os dois sistemas aquíferos apresentam características hidrogeológicas distintas, bem como águas com diferentes composições químicas. As estruturas tectônicas, que cortam as rochas vulcânicas e que dão origem aos aquíferos fraturados, podem ser responsáveis pela compartimentação estrutural do SAG, bem como pela conexão entre esses dois sistemas, dando origem a misturas e alterando a composição química das águas do SASG.

Nesse sentido, a presença dessas estruturas, mapeadas na região em diferentes escalas por Machado (2005a), Giardin e Faccini (2010), e Philipp et al. (2014), demonstra a importância que elas podem ter na delimitação de compartimentos estruturais, bem como na influência das características hidrogeológicas e hidroquímicas.

A presença de águas que diferem do grupo das bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, tipicamente encontradas no SASG, apresentando concentrações elevadas de sódio, sulfato, cloreto, permitiu aos autores Bittencourt et al. (2003), Athayde et al. (2007), Mocellin e Ferreira (2009), Bongioiolo et al. (2011), e Freitas (2016), supor que essas águas possam ter origem em aquíferos sotopostos, como aqueles que compõem o SAG, ou em alguns casos aquíferos até mais basais, denominados de pré-SAG.

Dessa forma, esse estudo buscou identificar a existência de compartimentação estrutural e a ocorrência de interações hidrogeológicas entre o SAG e o SASG, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, através da interpretação do arcabouço estrutural e hidrogeológico, bem como da análise hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas. A partir dessas informações, foi elaborado um modelo conceitual para representar e explicar os processos de interações hidrogeológicas entre os dois sistemas aquíferos. A elaboração desse modelo permitiu conhecer os processos envolvidos nas interações entre os dois sistemas, e poderá no futuro ser utilizado no desenvolvimento de projetos relacionados com a captação, gerenciamento, bem como a qualidade da água subterrânea nessa região.

1.2. Área de estudo

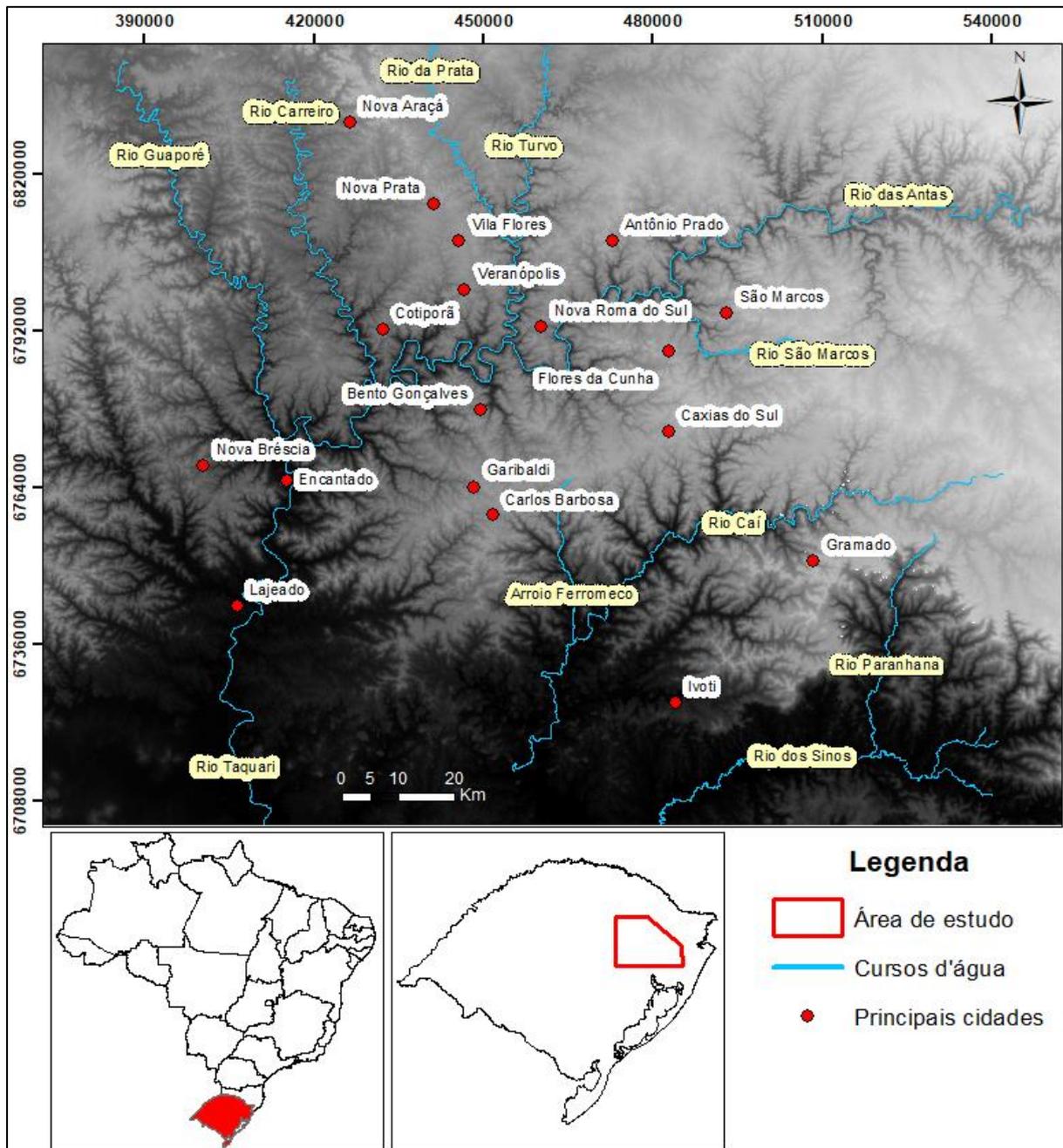
A área de estudo está localizada na região nordeste do Rio Grande do Sul (NERS), compreendendo desde as áreas elevadas do Planalto dos Campos Gerais, até a Escarpa da Serra Geral, na borda da Bacia do Paraná. Nesta região existem mais de 140 municípios, o que representa quase 30% do total do RS, com destaque para algumas das principais áreas urbanas do estado, como Caxias do Sul, Bento Gonçalves, Nova Prata, Lajeado, Garibaldi, Gramado e Carlos Barbosa. Na Figura 1 são apresentadas as principais cidades e cursos d'águas existente na área de estudo.

A principal utilização dos recursos hídricos subterrâneos na região é para o abastecimento público, tanto nas cidades, quanto nas áreas rurais, sendo as águas captadas principalmente do SASG. As águas também são muito utilizadas nas indústrias (vinícolas, fábricas de sucos e refrigerantes, laticínios, metalurgia/galvanoplastia, entre outras), nas atividades comerciais, na agropecuária e no lazer (estâncias de águas termais).

A opção, muitas vezes, de captar as águas do SASG, se deve ao fato de que, em geral, não são necessárias perfurações muito profundas, diminuindo assim os custos. Porém, para que exista a possibilidade de que o poço seja produtivo é necessário que se intercepte fraturas

contendo água. Como as fraturas não ocorrem em todos os locais, e como a produção dos poços que captam água desse sistema aquífero, em geral, não é elevada, surge como alternativa a captação das águas do SAG.

Figura 1 - Área de estudo com os principais cursos d'água e cidades da região.



Para obter a água do SAG são necessários poços mais profundos, visto que, para interceptar as rochas sedimentares que armazenam essa água é preciso, muitas vezes, perfurar um pacote de rochas vulcânicas, que podem variar desde dezenas a até centenas de metros.

1.3. Justificativa

Nos últimos anos, novos poços profundos foram e estão sendo perfurados na região, com o objetivo de captar água do SAG. No entanto, a perfuração é realizada com pouco conhecimento sobre a profundidade de ocorrência do SAG, bem como das características hidrogeológicas e hidroquímicas nesses locais.

O conhecimento sobre a compartimentação dos aquíferos se mostra muito importante, visto que, conhecendo essa compartimentação e as interações existentes entre o SAG e o SASG, é possível avaliar e gerenciar de forma mais eficiente a exploração dos recursos hídricos subterrâneos.

Por conta da grande heterogeneidade hidrogeológica e hidroquímica que estes aquíferos possuem em toda a sua área de abrangência, pesquisas desenvolvidas com um maior detalhamento, como o proposto neste estudo, tendem a aumentar o conhecimento nessas regiões, contribuindo com informações mais precisas, e proporcionando uma maior eficiência na utilização dessas águas.

2. OBJETIVO

O objetivo principal dessa pesquisa é identificar a compartimentação estrutural e a ocorrência de interações hidrogeológicas, entre os Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul (NERS).

Os objetivos específicos são:

- Identificar e mapear o topo do SAG na área de estudo;
- Determinar as características hidrogeológicas, hidrodinâmicas, hidroquímicas e isotópicas do SAG e do SASG;
- Identificar as principais estruturas tectônicas que atuam na compartimentação do SAG;
- Identificar as zonas de misturas de água entre os dois sistemas aquíferos;
- Elaborar um modelo conceitual de interações entre o SAG e o SASG.

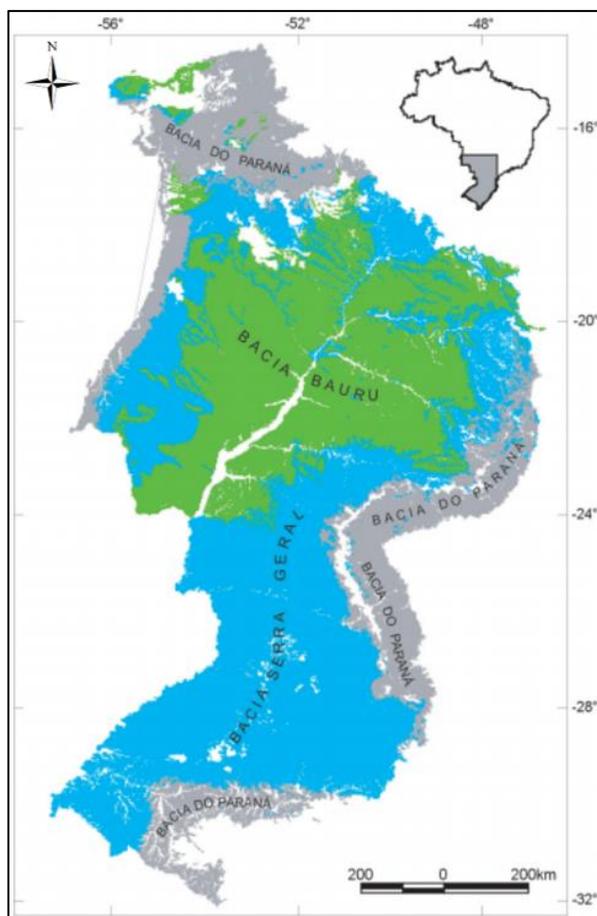
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção é apresentada uma fundamentação conceitual sobre as características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, estruturais, hidroquímicas e isotópicas, do SASG e do SAG, de modo a propiciar um embasamento sólido para o desenvolvimento das metodologias propostas para este estudo.

3.1. Contexto geológico regional

No contexto geológico, a região nordeste do Rio Grande do Sul faz parte da Província Paraná (Província Sedimentar Meridional), também comumente chamada de Bacia do Paraná (Figura 2), que é composta no Brasil por três bacias distintas, a Bacia do Paraná e a Bacia Serra Geral, onde a área de estudo está inserida, além da Bacia Bauru (SILVA et al., 2003). Esta Província se estende desde o Brasil até os territórios da Argentina, do Paraguai e do Uruguai, ocupando uma área de 1,5 milhões de km² (MILANI et al., 2007).

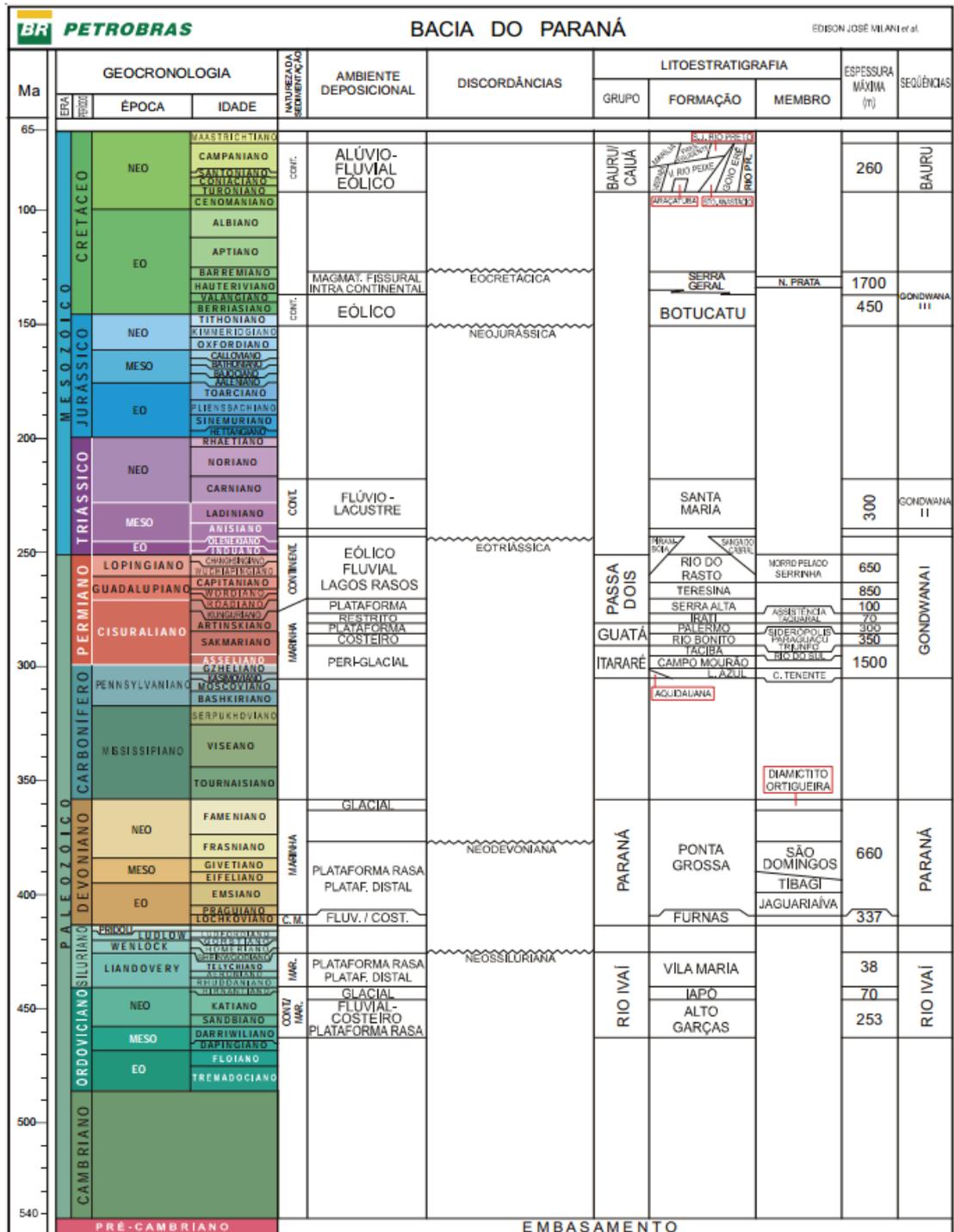
Figura 2 - Abrangência da Província do Paraná em sua porção brasileira.



Fonte: Silva et al. (2003).

A Bacia do Paraná é uma bacia intercratônica desenvolvida sobre a crosta continental e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, com idades que variam do Ordoviciano ao Cretáceo (ZALÁN et al., 1990), divididas por Milani (1997), em 6 unidades, as Supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Figura 3).

Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná.

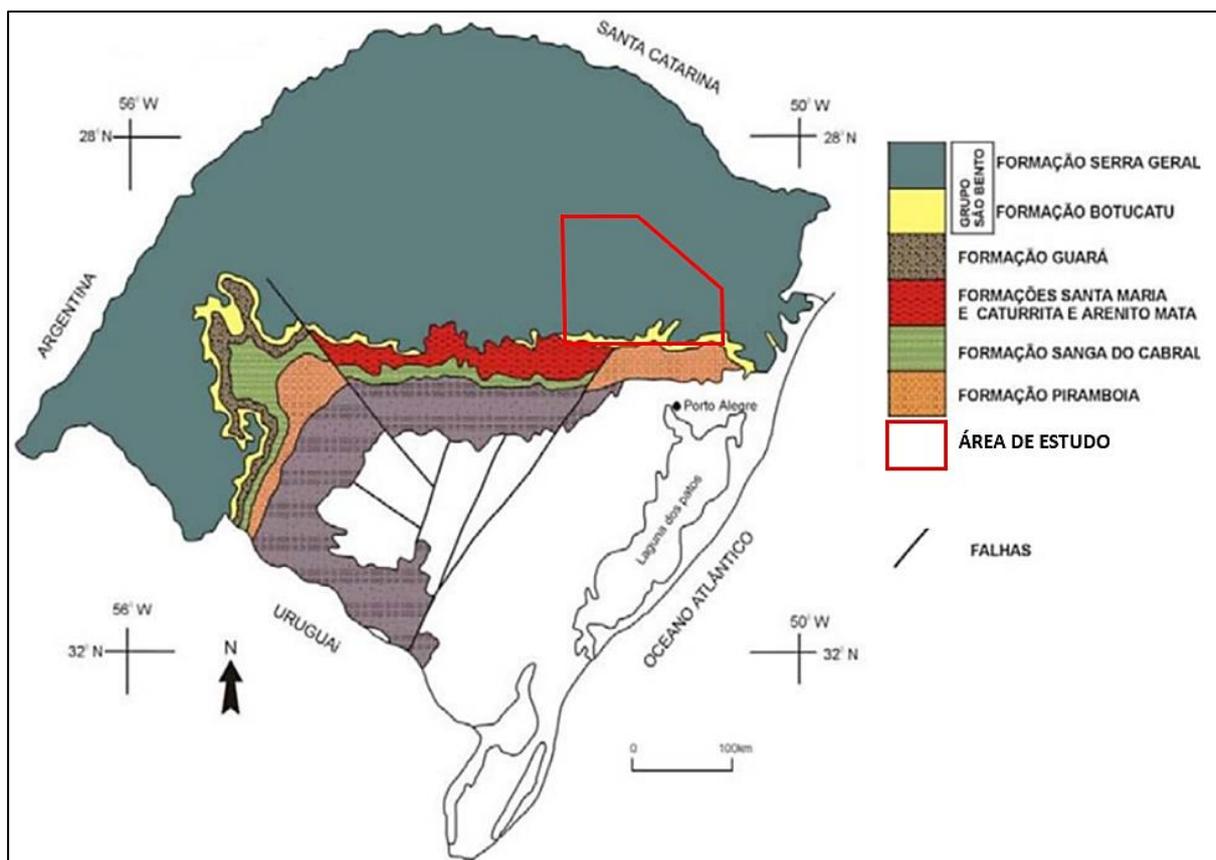


Fonte: Milani et al. (2007).

Na Bacia do Paraná, no estado do Rio Grande do Sul, verifica-se a existência das Formações Taciba, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto e Pirambóia (Supersequência Gondwana I), Sanga do Cabral, Santa Maria, Caturrita e Guará (Supersequência Gondwana II), Botucatu e Serra Geral (Supersequência Gondwana III) (MILANI, 1997; HOLZ e CARLUCCI, 2002; CPRM, 2006). Estas Formações, porém, não abrangem todas as áreas da Bacia, possuindo discordâncias de algumas delas ao longo do território, como verificado por Menezes (2002), Scherer et al. (2002), e Soares et al. (2008a).

No NERS, a Formação Serra Geral abrange quase que completamente a região, se ausentando do registro estratigráfico em pequenas áreas da escarpa e no fundo de alguns vales, sendo verificado nesses locais por Heine et al. (2005), Machado (2005a), e Giardin e Faccini (2011), o afloramento das Formações Botucatu e Pirambóia (Figura 4).

Figura 4 - Principais Formações geológicas presentes na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Dias (2006).

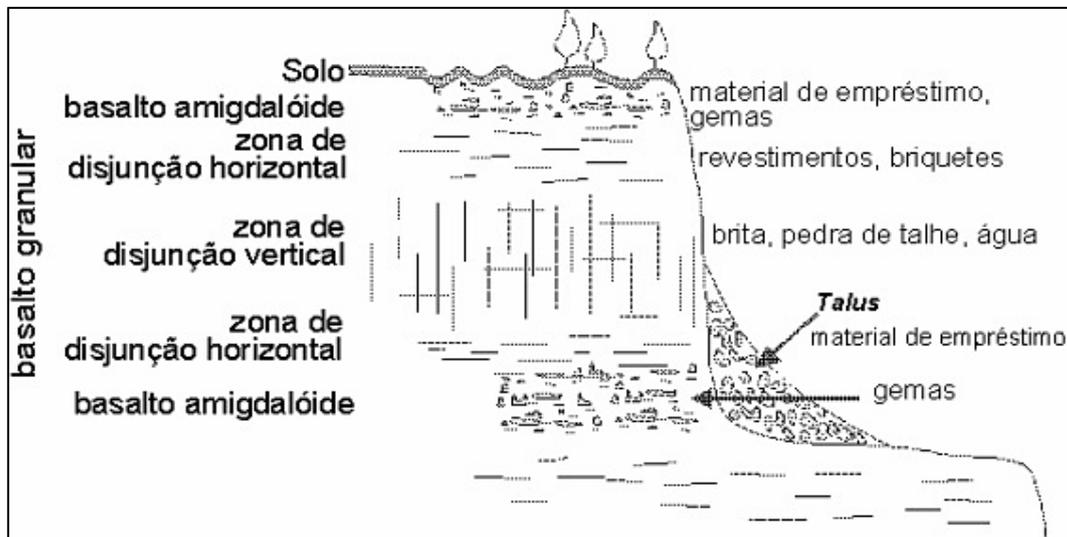
A Formação Serra Geral é resultado do intenso vulcanismo fissural, na forma de sucessivos derrames, associado à separação do supercontinente Gondwana, e é constituída de uma série de derrames básicos, sobrepostos ou intercalados por derrames ácidos,

representados pelas fácies, ou unidades, Esmeralda, Paranapanema, Caxias, Gramado e Várzea do Cedro. As espessuras dos derrames se relacionam com o paleorelievo da região, podendo chegar a 50 m para as rochas básicas e intermediárias, e a valores médios de 40 m, nas rochas ácidas, com o pacote total de rochas podendo chegar a mais de 1500 m (ZALÁN, 1987; ROISENBERG e VIERO, 2002; MARQUES e ERNESTO, 2004; CPRM, 2006).

Segundo Reginato e Strieder (2006a), na região NERS a sequência de rochas básicas são formadas por seis grandes derrames, com espessuras de algumas dezenas de metros, enquanto a sequência de rochas ácidas, composta por riocacitos, dacitos e riolitos, se distribuem em 3 derrames principais, com espessuras da ordem de 50 m.

As unidades Esmeralda, Paranapanema e Gramado são formadas por derrames de rochas basálticas e andesíticas, apresentando uma estruturação primária segundo Hausman (1995), Roisenberg e Viero (2002), e Trentin e Robaina (2006), formada na base e no topo por uma zona composta por vesículas e amígdalas, com presença de disjunções horizontais, sendo a espessura do topo maior que a da base, e na parte central por disjunções verticais (Figura 5).

Figura 5 - Seção geológica esquemática de um derrame.



Fonte: Wildner et al. (2006).

Os derrames intermediários a ácidos das Fácies Caxias e Várzea do Cedro, compostos, respectivamente, por riolitos e riocacitos, e derrames vitróficos, apresentam segundo Umann et al. (2001) e Roisenberg e Viero (2002), uma zona basal com presença de vitrófiros e brechas, seguido de uma espessa zona central maciça com fraturamento colunar, e vitrófiros com vesículas e amígdalas no topo.

Segundo Roisenberg e Viero (2002), a mineralogia das amígdalas presentes nas rochas provenientes dos derrames básicos e intermediário possui como espécie mais frequente as zeolitas, além dos registros de apofilita, ametista, calcedônia, ágata, opala, calcita e selenita. Já para as rochas dos derrames ácidos as amígdalas são parcialmente preenchidas por quartzo e calcita, e esporadicamente zeolitas.

A Formação Botucatu se constituiu a partir da deposição de sedimentos arenítico eólicos em um amplo campo de dunas, caracterizado pela ausência de interdunas úmidas (SCHERER, 2000). Os arenitos dessa Formação apresentam granulação que varia de média à fina, com coloração avermelhada à rosácea, e estratificação cruzada de grande porte (SCHERER, 2000; ASSINE et al., 2004).

Essa Formação abrange quase completamente a Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul, se ausentando da coluna estratigráfica, segundo Scherer et al. (2002) e Soares et al. (2008a), em alguns locais da porção central do estado, onde as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral recobrem os depósitos sedimentares flúvio-lacustre do Triássico.

Segundo Scherer (1998), a morfologia das dunas eólicas da Formação Botucatu foi preservada pelos derrames vulcânicos, o que para Scherer (2000) proporciona uma grande variação da sua espessura no estado, provocada pela significativa diferença altimétrica entre o topo e a base dessas paleodunas, visto que estas podiam chegar a até 100 m de altura.

O fato da sedimentação, bem como a migração das dunas, terem ocorrido concomitantemente com os derrames de rochas vulcânicas, proporcionou a ocorrência desses sedimentos entre os derrames, e com isso a formação de intertraps (MILANI, 2002; ASSINE et al., 2004). Segundo Waichel et al. (2008), isso ocorreu na forma de camadas finas de depósitos eólicos do Botucatu, inferiores a 15 m de espessura, e restrita a pequenas áreas, menores que 1 km².

Sotoposta à Formação Botucatu, na área de estudo, vale destacar ainda a presença das Formações Santa Maria, Sanga do Cabral, Pirambóia e Rio do Rasto. Segundo Giardin e Faccini (2011), na porção leste do estado se observa a ausência das Formações Santa Maria e Sanga do Cabral, com a Formação Pirambóia estando em contato direto com o Botucatu. Já na região central, Dias (2006) verificou a ausência da Formação Pirambóia, que está presente apenas nas regiões leste e oeste.

A Formação Santa Maria se divide em dois Membros, o Alemoa (acima) e o Passo das Tropas (abaixo). O primeiro é constituído por siltitos argilosos, de coloração avermelhadas, enquanto o segundo se caracteriza por ser predominantemente arenoso, com camadas pelíticas subordinadas (FACCINI et al., 2003).

A Formação Sanga do Cabral apresenta uma grande variação deposicional dependendo da área analisada, sendo formada por arenitos fluviais, recobertos por uma sucessão de pelitos e siltitos, com lamitos no topo (MILANI et al., 1998; SCHERER et al., 2002).

A Formação Pirambóia é constituída de arenitos finos a grossos, associada a Fácies de um sistema eólico úmido, com estratificação cruzada acanalada de médio e grande porte, e composta por um espesso pacote de areia eólica na forma de lençóis na base, sucedida por uma intercalação de dunas e interdunas úmidas (FACCINI et al., 2003; ASSINE et al., 2004; DIAS, 2006).

A Formação Rio do Rasto é composta por arenitos avermelhados, arroxeados e esbranquiçados, variando de finos a médios, intercalados por argilitos e siltitos, proveniente de ambientes lacustres (MENEZES, 2002).

3.2. Geomorfologia da região NERS

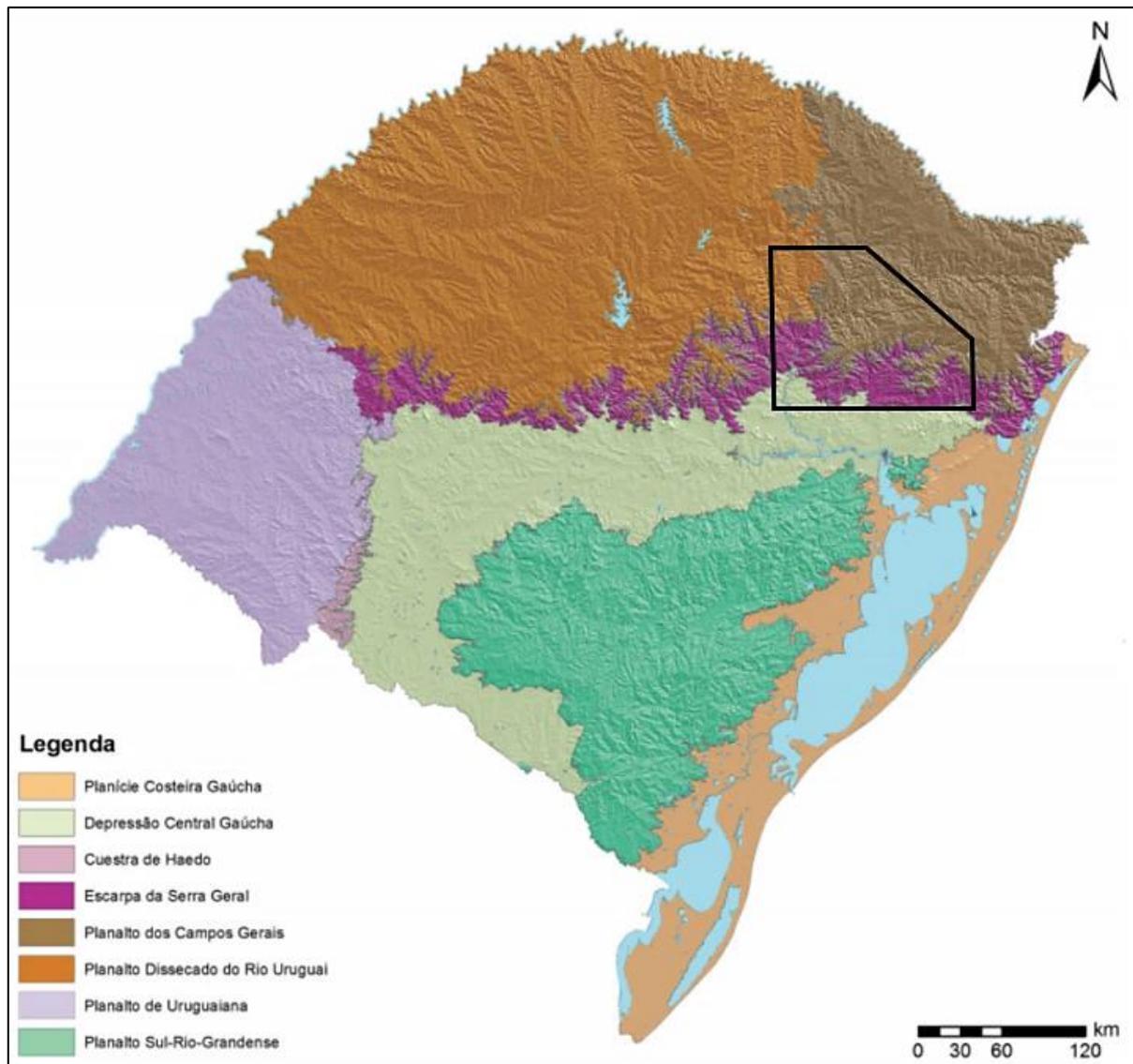
No contexto das regiões geomorfológicas, a área de estudo está inserida na porção gaúcha do Planalto das Araucárias, abrangendo as Unidades Geomorfológicas do Planalto dos Campos Gerais, da Serra Geral e dos Patamares da Serra Geral (IBGE, 1986). Em um mapeamento mais recente, que levou em consideração as informações do autor anterior, Dantas et al. (2010), identificou a existência de oito Domínios Geomorfológicos para o RS, com destaque para o Planalto dos Campos Gerais e Escarpa da Serra Geral (Figura 6).

Segundo IBGE (1986), e Dantas et al. (2010), o Planalto dos Campos Gerais na sua porção oeste caracteriza-se por áreas elevadas, geralmente aplainadas, com presença de vales bastante aprofundados, e ocorrência frequente de linhas estruturais ocupadas pelos cursos d'água. Já na porção leste destaca-se um relevo com dissecação diferencial, na forma de profundos entalhamentos fluviais encaixados em linhas estruturais. O Domínio da Escarpa da Serra Geral, corresponde aos terminais escarpados abruptos dos Planalto dos Campos Gerais (Serra Geral), e aos terminais rebaixados na forma de testemunhos do recuo da linha da escarpa (Patamares da Serra Geral), e consiste em um relevo de transição entre o Planalto dos Campos Gerais e a Depressão Central Gaúcha. Essas áreas caracterizam-se por uma profunda e intensa dissecação, com marcante controle estrutural, com a inserção de cursos d'água.

A variabilidade das características geomorfológicas atua diretamente sobre a dinâmica dos aquíferos. O grau de dissecação do relevo possui grande importância na formação de zonas de recarga e descarga dos aquíferos, com as áreas com alto grau de dissecação se

apresentando pouco propícias ao armazenamento de água, com a descarga ocorrendo principalmente através de fontes de encosta (HAUSMAN, 1995; LISBOA (1996); REGINATO e STRIEDER (2006b)).

Figura 6 - Domínios Geomorfológicos do RS, com destaque para a área de estudo.



Fonte: Adaptado de Dantas et al. (2010).

Bortolin (2018) verificou na Bacia do Taquari-Antas que as áreas mais favoráveis para a recarga do aquífero fraturado se encontram em zonas de baixa declividade, enquanto nas áreas mais íngremes e dissecadas, as taxas de recarga são bem menores.

Para Reginato (2003), a recarga do aquífero fraturado na região NERS ocorre, principalmente, pela infiltração da água nas camadas de solo, que funcionam como um reservatório, alimentando as fraturas. Além disso, as áreas onde o relevo se encontra mais

dissecado, são menos favoráveis à ocorrência de água subterrânea, por existir uma forte tendência de essas serem áreas de descarga do aquífero.

Segundo Lisboa (1996), as variações do manto de alteração influenciam nas características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas do SASG. Para este autor, na região NERS as áreas mais dissecadas tendem a apresentar espessuras menores que as áreas aplainadas.

3.3. Aspectos estruturais da Bacia do Paraná

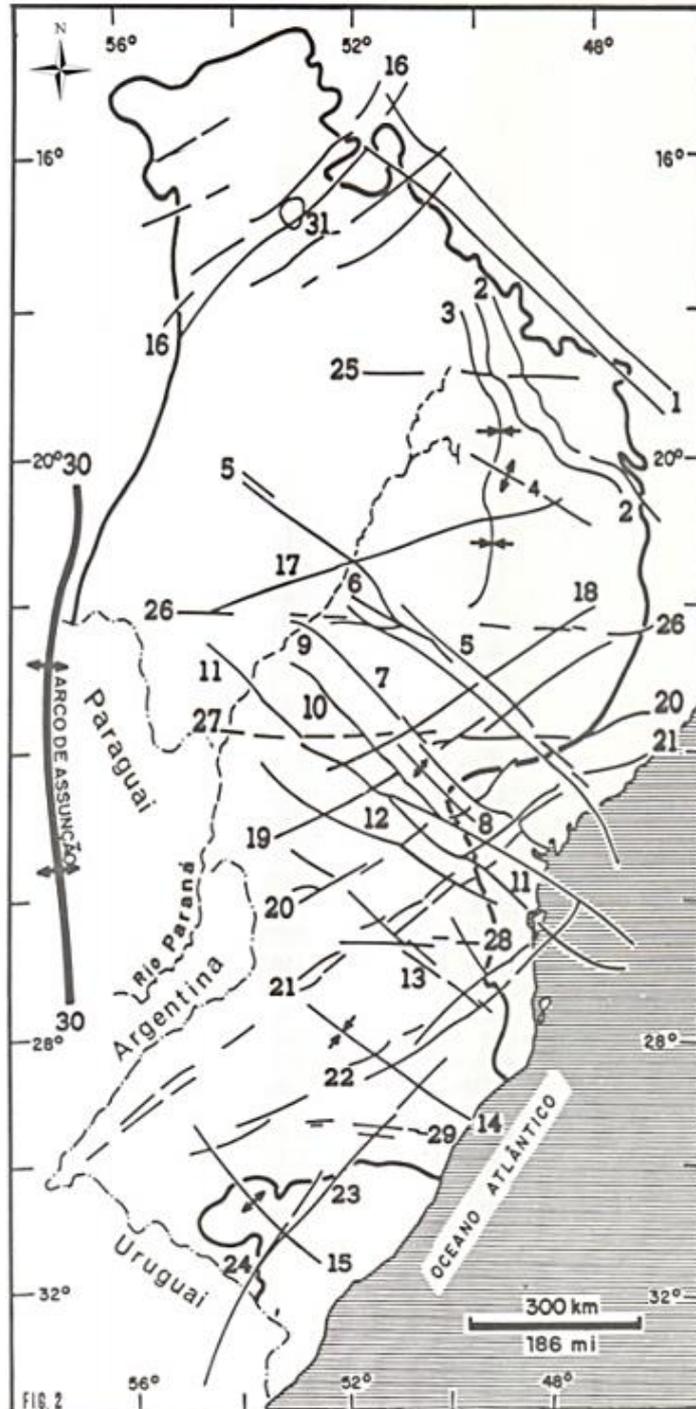
A evolução estratigráfica-estrutural da bacia do Paraná foi controlada por um sistema de falhas, oriundas de zonas de fraquezas existentes no embasamento. Essas zonas de fraqueza possuem um alinhamento principal nas direções NE e NW, com as zonas de cisalhamento dúctil ocorrendo principalmente na orientação N60-70E, enquanto o sistema de fraturamento na orientação N20-50W (ZALÁN et al., 1987; ZALÁN et al., 1990; MILANI et al., 1998; TRENTIN e ROBAINA, 2006).

Essa estruturação do embasamento refletiu diretamente nas orientações das grandes estruturas encontradas na Bacia do Paraná. Por esse motivo, segundo Zalán et al. (1987), as principais estruturas tectônicas da Bacia do Paraná apresentam feições lineares ortogonais, podendo ser divididas em orientações NE (N50-70E), NW (N45-65W) e E-W (Figura 7). As duas principais, NE e NW, relacionadas às zonas de fraqueza do embasamento, foram recorrentemente ativas, sendo constituídas por falhas simples ou extensas zonas de falhas. Já o terceiro grupo, com direção E-W, segundo Zalán et al. (1990), se desenvolveu sobre influência da separação continental no desenvolvimento do Atlântico Sul.

Esse mesmo padrão foi verificado em praticamente todas as regiões de abrangência da Bacia do Paraná em território brasileiro, nas mais diversas escalas e métodos de análise estrutural, tanto em estudos regionais, quanto locais. Para destacar esse cenário, pode ser citado na região sul do Brasil alguns trabalhos como o de Ferreira et al. (2005) e Bongioiolo et al. (2011) no Paraná (PR), Roldan et al. (2010) em Santa Catarina (SC), além de Mobus (1987), Takahashi et al. (1993), Lisboa (1996), Reginato e Strieder (2006b), Wankler (2006), Soares et al. (2007a), Philipp et al. (2014) e Freitas (2016) no Rio Grande do Sul.

Segundo Manoel Filho (1997), as estruturas estão relacionadas com deformações sofridas pelas rochas posteriormente à deposição ou cristalização que a formou, e se apresentam, principalmente, na forma de juntas, fraturas, falhas e dobras.

Figura 7 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná, com destaque para as principais estruturas na região NERS: 14-Sinclinal de Torres; 22-Zona de Falha Blumenau/Soledade; 23-Falha do Leão; 29-Lineamento de Bento Gonçalves.



Fonte: Adaptado de Zalán et al. (1987).

Em superfície, o reflexo dessas estruturas pode ser identificado na forma de lineamentos, definido por O’Leary et al. (1976), como sendo feições lineares de superfície, que possam ser mapeáveis, ocorrendo de forma simples ou composta, alinhadas de maneira

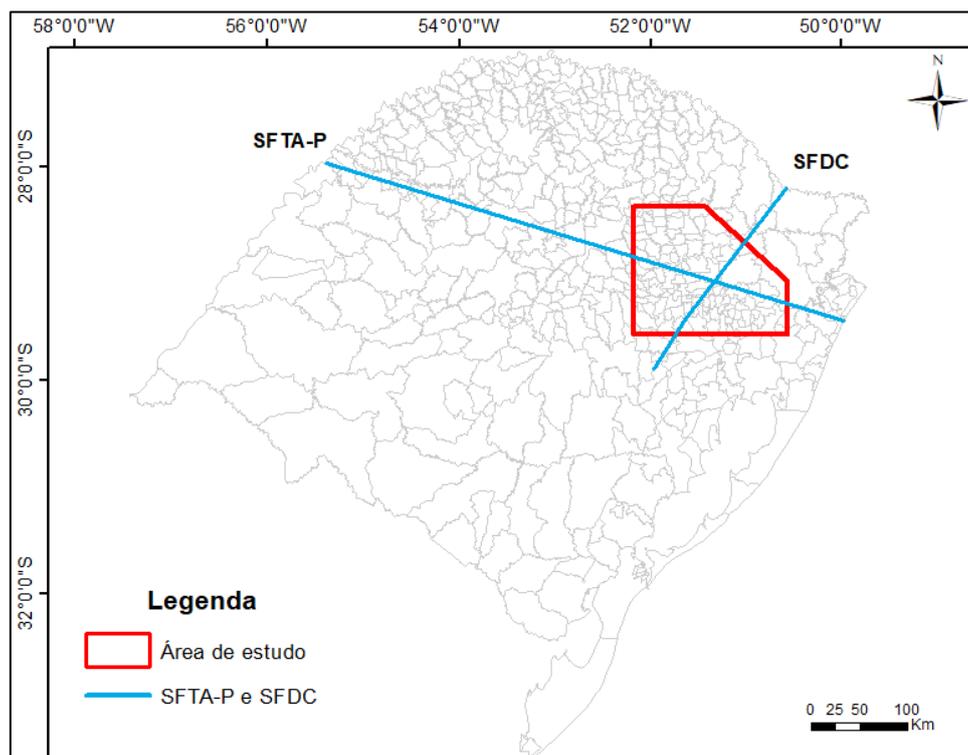
retilínea ou pouco curvada, que se diferencie de outras feições lineares próximas, e que possam refletir estruturas existentes em subsuperfície. Nesse sentido, para Lisboa (1996), o lineamento deve ser considerado como uma morfoestrutura, e não uma litoestrutura. Para Takahashi et al. (1993), a morfoestrutura reflete, mas não se confunde com a litoestrutura, cujo domínio é a subsuperfície.

Soares et al. (2007a), utilizaram o traçado de lineamentos elaborados por diversos autores para identificar, através da recorrência dos seus segmentos em diferentes direções, a melhor composição de traçados para o mapeamento dos lineamentos na Bacia do Paraná. Os autores verificaram uma forte concordância com as direções NW e NE, e baixa concordância nas direções NNW, WNW, NNE e ENE.

Na região NERS foram identificados vários lineamentos morfoestruturais de pequeno, médio e grande portes, mapeados em diferentes escalas, por autores como Machado (2005a), Betiollo (2006), Reginato e Strieder (2006b), Giardin e Faccini (2010), Bortolin et al. (2014) e Philipp et al. (2014).

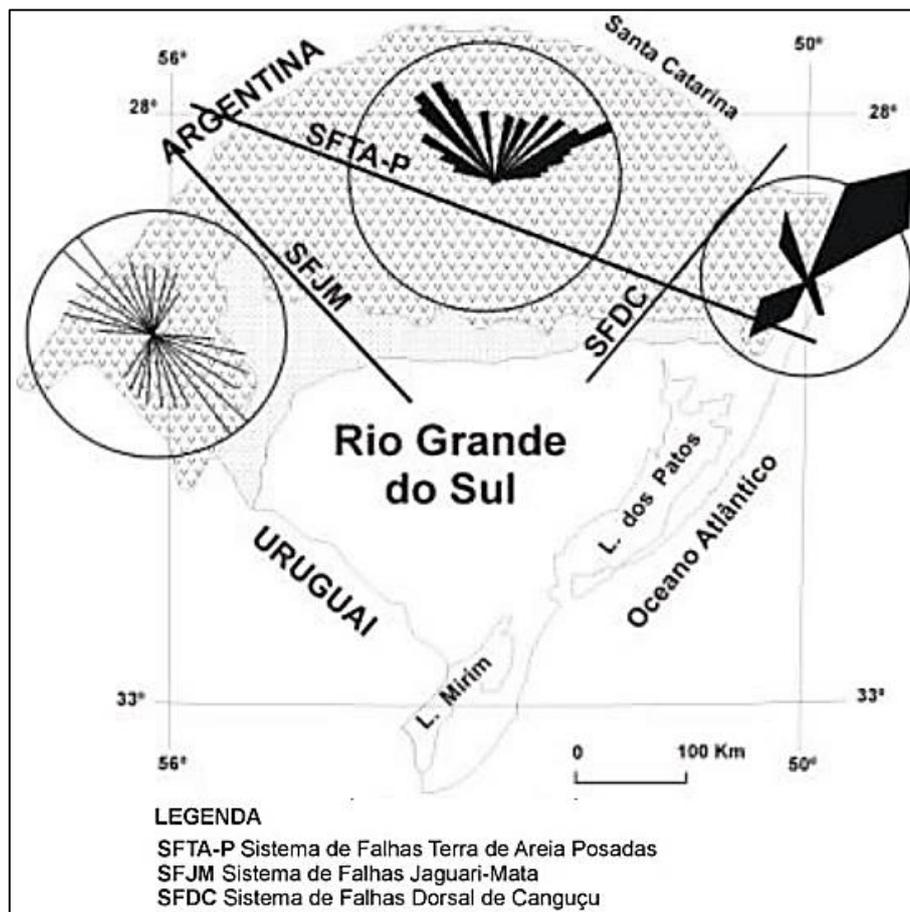
Nessa região destacam-se dois grandes sistemas de falhas, ou zonas de falhas, a Dorsal de Canguçu (SFDC), que segundo Machado (2005a), corresponde ao prolongamento da Falha do Leão em direção ao estado de Santa Catarina, e a Terra de Areia-Posadas (SFTA-P), com o cruzamento entre elas ocorrendo na parte centro-sul da área de estudo (Figura 8).

Figura 8 - Localização do SFTA-P e SFDC na área de estudo.



Segundo Machado e Faccini (2004), na região NERS há um predomínio das fraturas na direção nordeste e secundariamente na direção noroeste, enquanto na porção central a distribuição dos lineamentos ocorre em diferentes direções, tanto no quadrante nordeste, quanto no noroeste (Figura 9).

Figura 9 - Principais sistemas de falhas no RS.



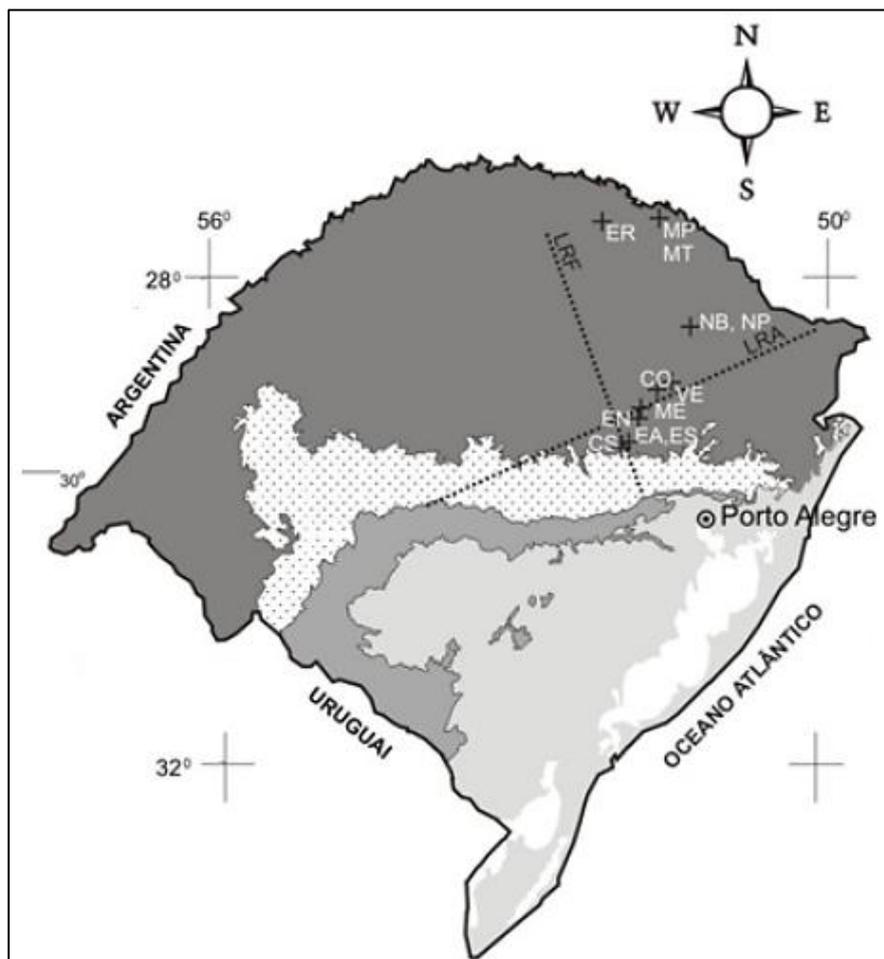
Fonte: Adaptado de Machado e Faccini (2004).

Giardin e Faccini (2010) delimitaram duas grandes estruturas na área de estudo, correspondentes a zonas de falhas, identificadas em escala 1:5.000.000, denominadas Lineamento Rio das Antas (LRA) e Lineamento Rio Forqueta (LRF), parcialmente encaixados nos vales dos rios de mesmo nome, e com azimutes 065° e 340° , respectivamente (Figura 10).

Philipp et al. (2014), utilizaram a modelagem de dados magnetotelúricos em conjunto com informações geológicas, estruturais e geofísicas, para a caracterização das estruturas no estado do RS. Os autores verificaram um grande número de falhamentos NW-SE e NE-SW, que interceptam todos os pacotes de rochas, do embasamento à superfície. Destaca-se na

região NERS o aumento da espessura das rochas sedimentares referentes a Bacia do Paraná no sentido SW-NE, acompanhando o contorno da Sinclinal de Torres, sendo a continuidade das camadas interrompidas por grandes sistemas de falhas regionais, como as Falhas Torres-Posadas, Não-me-Toque/Capão da Canoa e Santo Ângelo-Barra do Ribeiro.

Figura 10 - Localização dos lineamentos LRA e LRF.



Fonte: Adaptado de Giardin e Faccini (2010).

Segundo Betiollo (2006), nessa região são mais abundantes os lineamentos na direção NE, principalmente N60-80E. Os lineamentos de maior porte possuem direção principal NW, e secundária NE, com destaque para uma grande concentração dessas estruturas na região dos municípios de Caxias do Sul e Bento Gonçalves. Além disso, a área próxima ao encontro dos sistemas de falhas SFTA-P e SFDC, possui uma grande densidade de lineamentos NE e NW de médio porte (entre 10 e 100 km).

Bortolin et al. (2014), utilizando imagens de satélite, identificaram 266 lineamentos morfoestruturais para a região do município de Carlos Barbosa-RS, sendo a maioria de

pequeno porte (< 10 km), com orientação preferencial noroeste (N0-10W, N20-30W, N40-50W e N60-70W), e secundária para nordeste (N30-50E).

Reginato e Strieder (2006b) fizeram um levantamento dos principais lineamentos na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, no NERS, a partir da interpretação de fotografias aéreas na escala 1:60.000, identificando 4.154 morfoestruturas de pequeno porte, apresentando 4 grupos principais de orientações, N-S, E-W, NW e NE, com destaque para as duas últimas. Os autores identificaram em campo um padrão ortogonal para o sistema de fraturas, com orientações NE e NW, além da presença de diques de diabásio com orientação N50-60E.

Na porção sul da Bacia do Paraná, segundo Zalán et al. (1990), os arcos de Rio Grande e Ponta Grossa influenciaram a configuração da bacia, sendo representadas por duas semi-elípticas reentrâncias, que constituem caminhos preferenciais para a intrusão de diques de diabásio e rochas ígneas alcalinas.

Segundo Zalán et al. (1987) e Roisenberg e Viero (2002), a ocorrência de grandes diques de diabásio são típicas de zonas de falhas com direção NW. Umann et al. (2001) verificou na região de Cambará do Sul a presença de diques intrudindo em estruturas com essa direção principal.

3.4. Contexto hidrogeológico

Os aquíferos são camadas ou corpos rochosos nos quais seus poros, fraturas ou fissuras são grandes o suficiente para armazenar e transmitir volumes significativos de água em condições naturais. Os aquíferos, por outro lado, apesar de possuírem um volume de água, a sua transmissão ocorre em taxas muito pequenas. Já os aquíferos são considerados como formações impermeáveis, impossibilitando a movimentação da água (FREEZE e CHERRY, 1979; UEHARA, 2013).

O modo como ocorre o fluxo de água nas rochas depende diretamente da quantidade de espaços vazios pela qual ela possa se movimentar, ou seja, sua porosidade. Essa porosidade pode ser primária, quando o fluxo de água ocorre entre os grãos, ou secundária, entre fraturas (FETTER, 2001).

Enquanto nas rochas vulcânicas há a atuação da porosidade secundária, nas rochas sedimentares é mais comum a atuação da porosidade primária. Porém, segundo Oliveira e Campos (2012) e Paula e Campos (2016), em arenitos silicificados, a presença de fraturas tende a proporcionar a essas rochas uma porosidade mista. Nesse sentido, Reginato (2003),

indica que os arenitos que estão em contato com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral podem estar silicificados.

No contexto hidrogeológico, na área de estudo há a presença do Sistema Aquífero Guarani, aflorando ao sul, e que está recoberto nas demais áreas pelas rochas vulcânicas correspondentes ao Sistema Aquífero Serra Geral.

3.4.1. Caracterização hidrogeológica do SAG

O Sistema Aquífero Guarani é um dos principais reservatórios de água do mundo, ocupando uma área de 1.087.000 km² dos territórios do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Apesar de apresentado na sua concepção inicial como um sistema homogêneo, estudos desenvolvidos nas últimas décadas por autores como Hausmann (1995), Rosa Filho et al., (2003), Machado (2005a), Soares et al., (2008b) e Giardin e Faccini (2011), contribuíram para demonstrar a grande variabilidade hidrogeológica e hidroquímica que o SAG possui.

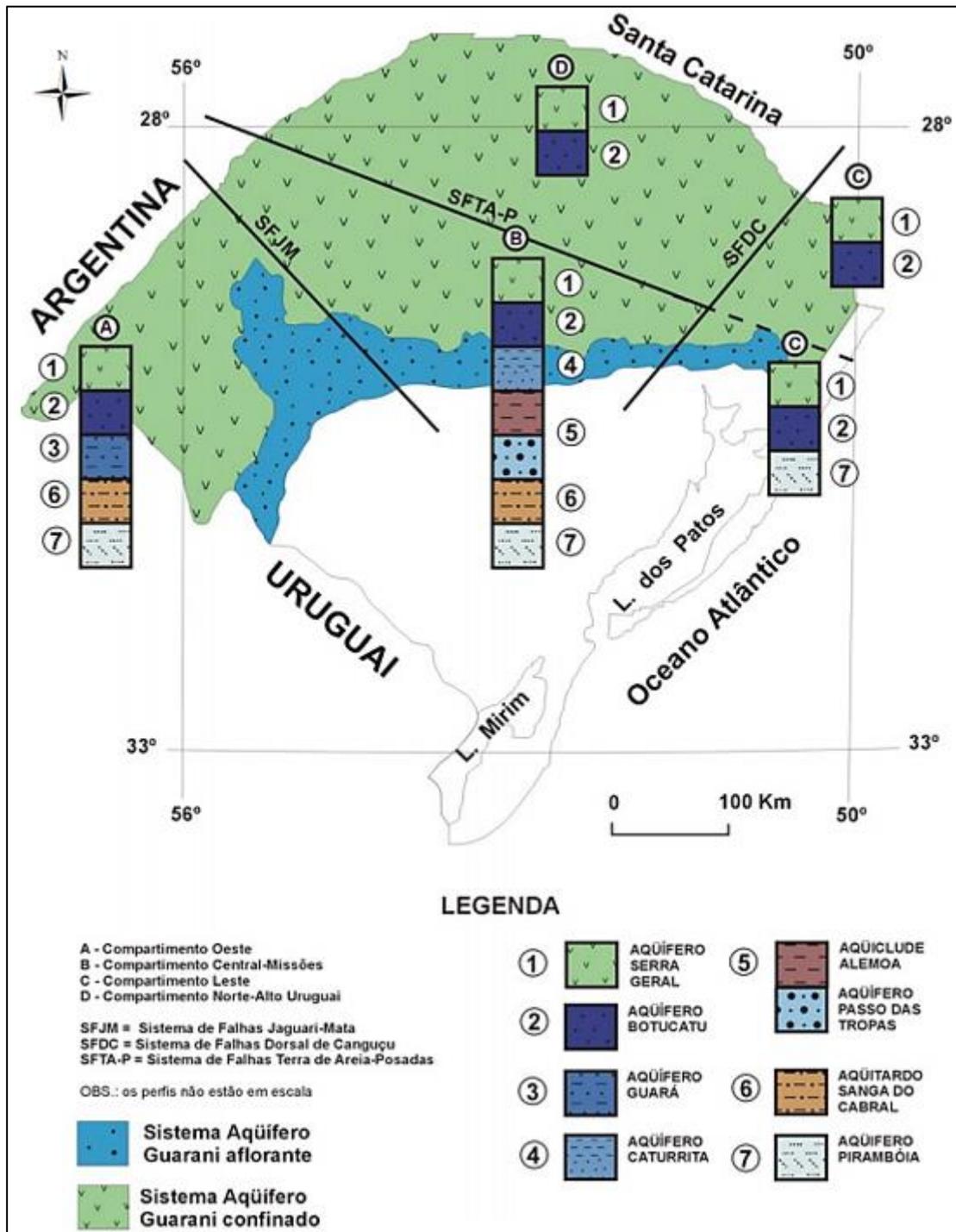
Segundo Araújo et al. (1995), o comportamento estrutural do SAG, que na época do estudo era denominado Aquífero Gigante do Mercosul, foi controlado por diversos fatores, como a ativação de sistemas de falhas, soerguimento das bordas da Bacia, ativações dos arcos, bem como aos processos vulcânicos que deram origem à Formação Serra Geral.

Para Machado (2005b), em uma análise baseada nas heterogeneidades das suas características hidroquímicas, potencialidade, além das suas descontinuidades laterais, apresenta o SAG como composto por vários compartimentos, não apresentando necessariamente conexões entre eles.

Na porção Brasileira, as principais Unidades Hidroestratigráficas do SAG são formadas pelos arenitos eólicos que compõem os Aquíferos Botucatu e Pirambóia, sendo limitadas segundo Machado e Freitas (2005), no topo, pelo contato com o primeiro evento de lavas basálticas que compõem a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, e na base pelo contato com o Aquicludo Rio do Rasto.

No Rio Grande do Sul, o SAG apresenta uma hidroestratigrafia bem mais complexa. Segundo Giardin e Faccini (2011), o contato direto entre o Aquífero Botucatu e Pirambóia ocorre apenas na região leste do estado, enquanto nas demais áreas, segundo Machado (2005a), temos a presença dos Aquíferos Guará, Caturrita e Passo das Tropas, bem como do Aquicludo Alemoa e do Aquitardo Sanga do Cabral (Figura 11).

Figura 11 - Arcabouço hidroestratigráfico do SAG no RS.

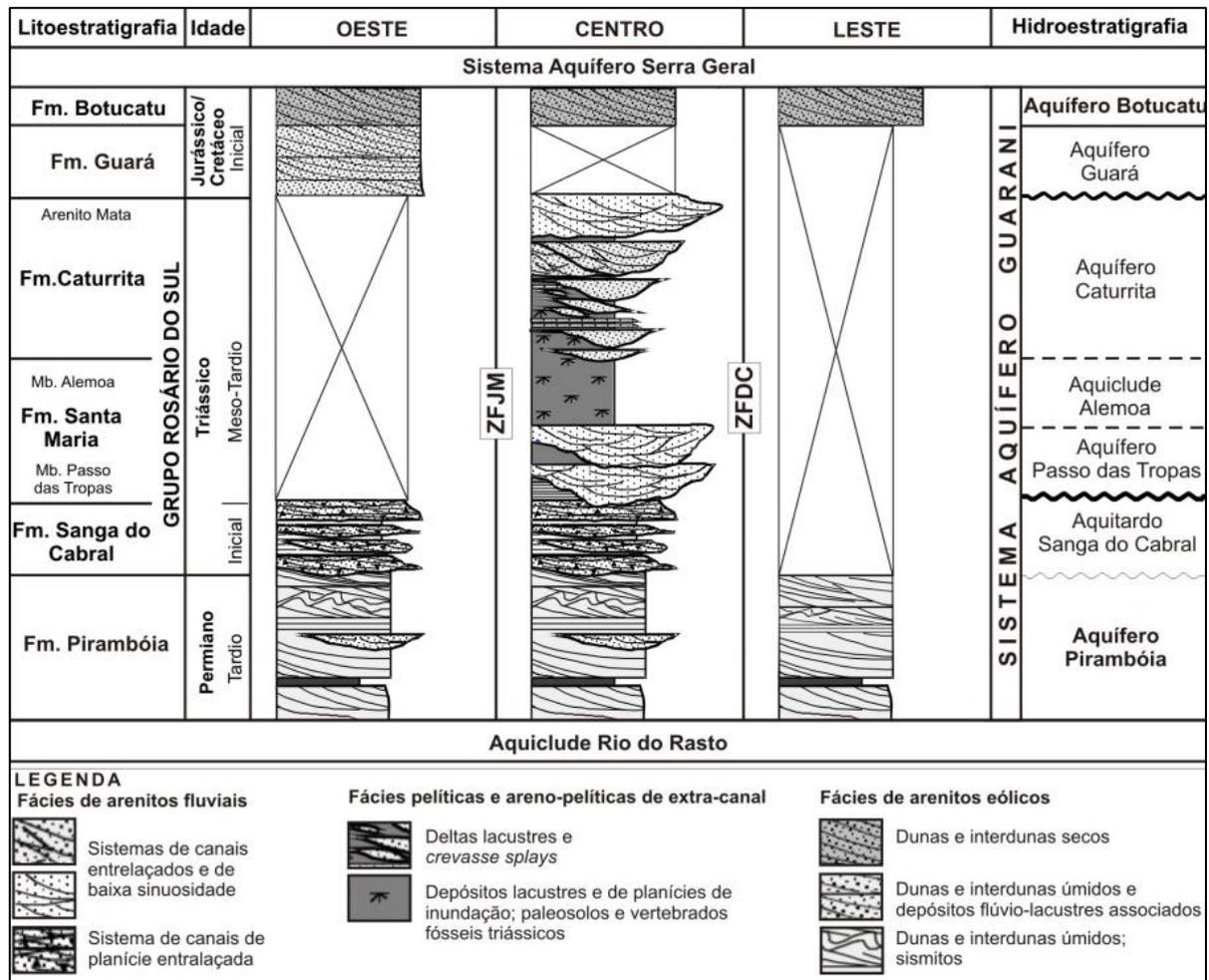


Fonte: Machado (2005a).

Na região NERS o principal componente do SAG é o Aquífero Botucatu, que se encontra confinado na sua maior parte pelas rochas vulcânicas, tornando-se livres principalmente em afloramentos localizados próximos da região das escarpas. Além dele, há também a presença dos Aquíferos Pirambóia e Passo das Tropas, do Aquiclude Alemoa, e do

Aquitardo Sanga do Cabral (SOARES et al., 2008a; GIARDIN e FACCINI, 2011) (Figura 12). A área de estudo se encontra inserida próxima a divisa entre as porções leste e central.

Figura 12 - Estruturação hidroestratigráfica esquemática dos diferentes setores do SAG no sul da Bacia do Paraná.

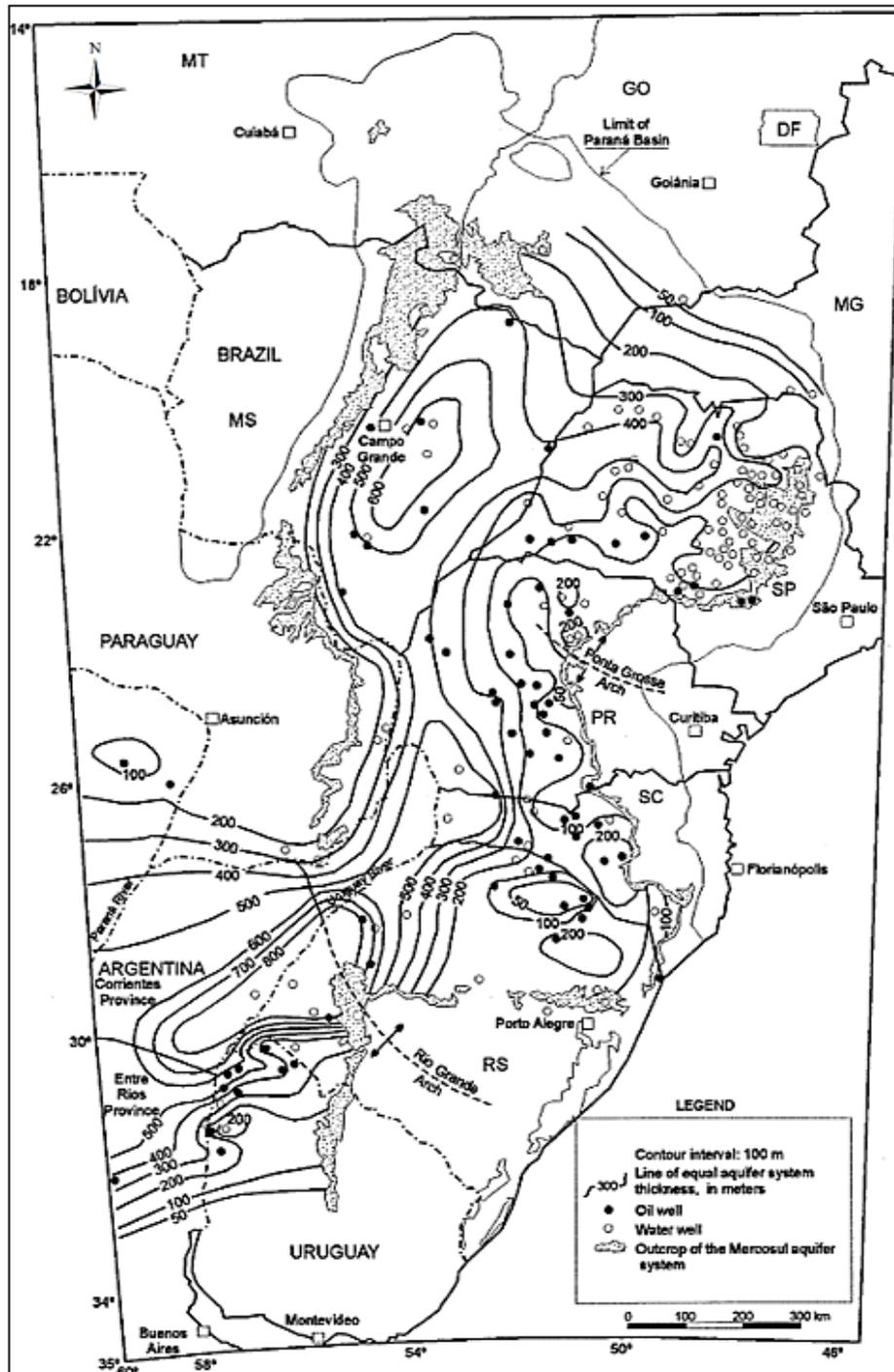


Fonte: Adaptado de Giardin e Faccini (2011).

Com exceção do Aquiclude Alemoa e do Aquífero Passo das Tropas que se relacionam com os respectivos Membros da Formação Santa Maria, as demais Unidades Hidroestratigráficas estão associadas às Formações de mesmo nome presentes na Bacia do Paraná.

Segundo Araújo et al. (1995), as variações nas características hidrogeológicas do SAG estão relacionadas às mudanças no ambiente de deposição, ao controle erosional e da evolução estrutural da Bacia. Na área de estudo, segundo Araújo et al. (1999), o SAG pode apresentar espessuras superiores a 200 m, com isópacas com valores médios entre 100 m e 200 m (Figura 13).

Figura 13 – Variação da espessura do SAG na Bacia do Paraná.



Fonte: Araújo et al. (1999).

Nessa área, Giardin e Faccini (2010) verificaram que a espessura do Aquífero Pirambóia tende a aumentar no sentido N-S, seguindo de Erechim em direção ao Rio dos Sinos, passando de 24 m à 70 m, com 44 m em Nova Prata. O Aquífero Botucatu segue essa mesma tendência, passando de 34 m em Erechim para 187 m em Nova Prata. Próximo à escarpa, no município de Cruzeiro do Sul, os autores verificaram a ausência do Aquífero

Botucatu, com as rochas vulcânicas assentando-se diretamente sobre rochas pelíticas do Aquiclude Alemoa. Já em Estrela-RS, segundo Giardin e Faccini (2011), com a ausência do Aquífero Botucatu, temos sotoposto às rochas vulcânicas, o Aquiclude Alemoa, e logo abaixo, o Aquífero Passo das Tropas.

O contorno estrutural do topo do SAG apresenta grande variação altimétrica tanto na escala da Bacia do Paraná, quanto para o estado do Rio Grande do Sul. O mapeamento de pequena escala proposto por Araújo et al. (1999), apesar de apresentar um contorno do topo com um bom detalhamento, não representava as heterogeneidades reconhecidas nos dias de hoje. Estudos posteriores, abrangendo todo o estado, como em Machado (2005a) e Machado e Freitas (2005), ou em escalas de maiores detalhes como em Betiolo (2006) e Heine (2008), têm contribuído para um mapeamento mais completo do topo do SAG para a área de estudo.

Para Machado (2005a), na região NERS o topo do SAG possui um decréscimo no sentido NE-SW, a partir da fronteira com o estado de Santa Catarina, próximo ao município de Bom Jesus, onde foram encontradas cotas entorno de 500 m.s.n.m., em direção a Caxias do Sul, onde foram verificadas cotas próximas de 0 m.s.n.m. Deste ponto, em direção à oeste, as cotas assumem valores cada vez mais negativos, chegando a -900 m.s.n.m. na fronteira com a Argentina. Vale destacar também a presença de cotas do topo do SAG mais elevadas na borda sul, que decrescem também em direção a Caxias do Sul.

Segundo Reginato et al. (2013), a cota do topo do SAG na região NERS varia de -32 m.s.n.m. na calha do Rio das Antas, nas regiões de Santa Tereza, Monte Belo do Sul, Cotiporã, Veranópolis e Bento Gonçalves, até -162 m.s.n.m. em direção a Nova Prata ao norte, e a cotas próximas de 0 m.s.n.m. em direção a Carlos Barbosa e Caxias do Sul.

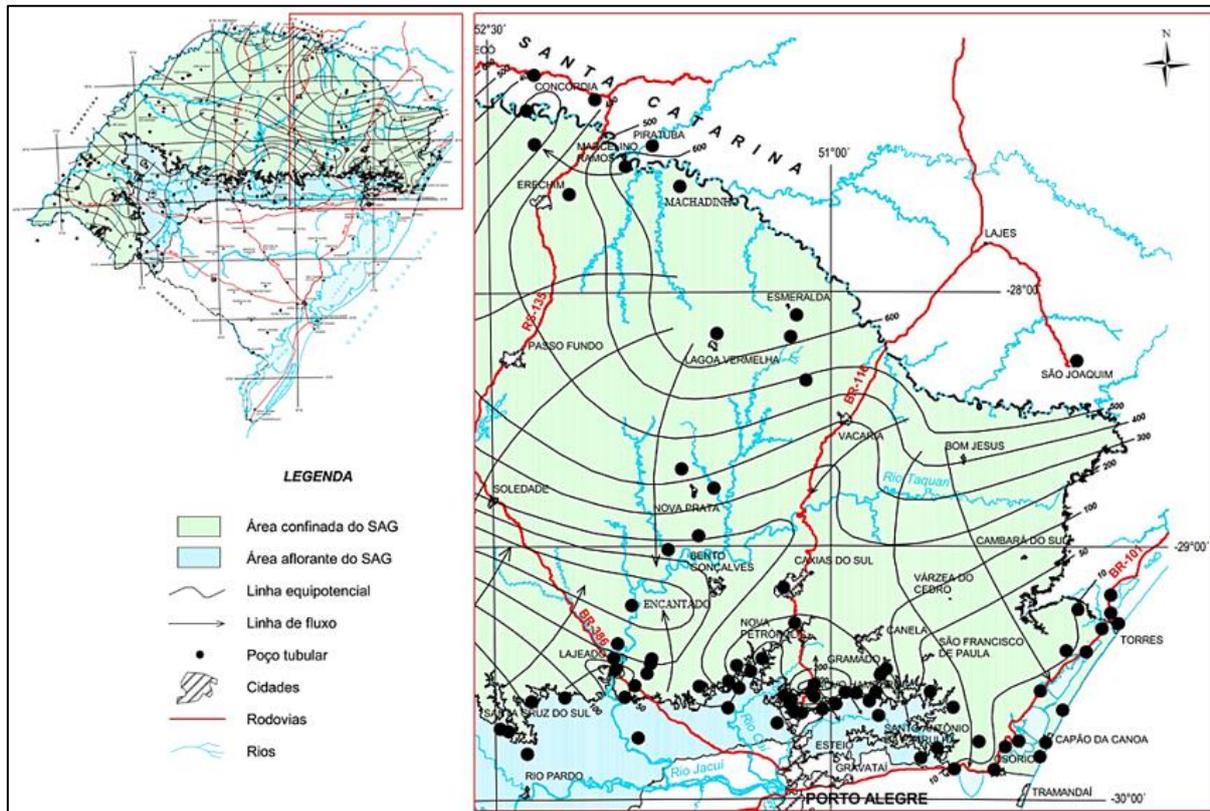
Estudos mais antigos, como os desenvolvidos por Araújo et al. (1995) e Araújo et al. (1999), indicavam um direcionamento do fluxo de água subterrânea do SAG, sob influência do Arco de Ponta Grossa, a partir da zona de recarga em Santa Catarina, em direção ao sul, mudando de sentido para sudoeste a partir de Torres-RS, apresentando um gradiente quase que constante de 3m/km em todo estado.

Estudos posteriores, como os desenvolvidos por Giardin e Faccini (2004), Machado (2005a), Soares et al. (2007a), porém, demonstram que outras estruturas também apresentam grande influência sobre o fluxo de água do SAG, chegando a causar, em alguns casos, descontinuidades hidráulicas.

Quanto a potenciometria na região NERS, com base no mapa desenvolvido na escala 1:3.000.000 por Machado (2005a), temos que a cota potenciométrica do SAG confinado tende a diminuir da porção norte, onde são encontrados valores elevados, em direção à Encantado,

na parte central, e à Osório na porção sudeste. Além disso, são verificadas localmente potenciometrias mais elevadas na borda sul da área, apresentando também um decréscimo em direção à Encantado (Figura 14).

Figura 14 - Mapa potenciométrico do SAG com destaque para a região NERS.



Fonte: Adaptado de Machado (2005a).

Esse mesmo padrão também foi verificado por Giardin e Faccini (2010), com a superfície potenciométrica diminuindo no sentido N-S, de mais de 500 m.s.n.m. no município de Machadinho-RS até a 0 m.s.n.m. em Encantado. Para Betiollo (2006), essa variação na potenciometria condiciona o fluxo de água, convergindo para o Sistema de Falhas Terra de Areia-Posadas, na parte central da região.

Soares et al. (2007b) ao analisar o mapa de fluxo potencial para as Unidades Hidroestratigráficas Pirambóia e Botucatu para a Bacia do Paraná, baseado nos grandes lineamentos estruturais, na declividade e na espessura do aquífero, indicam um padrão diferente para o fluxo na região NERS. Os autores consideram nessa região que o fluxo do Aquífero Botucatu segue da porção central em direção ao nordeste, para Santa Catarina, e ao sul, para a borda da bacia, considerada como zona de descarga. Já no Aquífero Pirambóia, a tendência de fluxo em direção a nordeste se mantém.

Na região de Caxias do Sul-RS, Freitas et al. (2004) verificaram que, em geral, o nível estático encontra-se em cotas acima dos 160 m.s.n.m. Já em Cotiporã, Nova Prata, Veranópolis e Nova Bassano, as cotas variam entre 130 e 200 m.s.n.m.

Em Ivoti-RS, segundo Machado e Freitas (2005), apesar de o Aquífero Botucatu se encontrar confinado pelas rochas vulcânicas, por conta dos seus níveis de pressão posicionados abaixo do seu topo, ele funciona hidrologicamente como um aquífero livre.

Nesse mesmo município, Heine (2008) analisando a variação do nível estático dos poços que captam água do SAG entre os anos de 1973 a 2003, verificou que o bombeamento excessivo provocou um rebaixamento da superfície potenciométrica entre 8 e 53 m, com o SAG apresentando um comportamento de aquífero livre. Isso evidencia a possibilidade da existência de alterações na potenciometria da região causadas por ações antrópicas.

Com relação a produtividade dos aquíferos, temos que ela está atrelada à diferentes fatores, como as características das rochas (capacidade de armazenamento), a espessura do pacote, além da existência e características de estruturas tectônicas. A região NERS ainda carece de estudos mais amplos quanto a potencialidade hídrica das Unidades Hidroestratigráficas que compõem o SAG, principalmente nas regiões onde ele se encontra com alto confinamento.

Segundo Hausman (1995), em Santo Antônio da Patrulha-RS, poços perfurados no aquífero Botucatu fora dos alinhamentos estruturais apresentaram vazões baixas à nulas, enquanto as maiores vazões se encontraram em poços localizados perto de lineamentos com direção N24E.

Para Freitas et al. (2004), apesar das litologias eólicas, os poços que atravessaram o Aquífero Pirambóia em Estância Velha-RS apresentaram menores potencialidades hídricas, quando comparadas com aqueles que interceptaram o Aquífero Botucatu.

Na região de Lajeado, Sousa et al. (2002) verificaram que as maiores vazões do SAG encontram-se nos locais onde o Aquífero Botucatu se encontra sotoposto as rochas vulcânicas, com vazões entre 10 e 30 m³/h. Além disso, os poços situados próximo de falhas regionais apresentaram vazões de até 120 m³/h. Nos locais onde o Aquífero Botucatu se ausenta, foram encontradas as menores vazões, abaixo dos 10 m³/h.

Segundo Machado (2005a), no vale do rio Taquari, entre os municípios de Estrela, Encantado e Teutônia, as produções da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu variam entre 20 e 70 m³/h, dependendo da espessura, confinamento e penetração do aquífero. Já entre Feliz e Dois Irmãos as vazões variaram de 10 e 70 m³/h, e as capacidades específicas de 0,5 a 2,0 m³/h/m. Em Santo Antônio da Patrulha, os arenitos possuem alto teor de argila e estão

endurecidos, com a circulação ocorrendo preferencialmente pelas fraturas não preenchidas e secundariamente pelos poros, com as vazões variando de nulas a 60 m³/h.

Isso demonstra que tanto no território do RS, quanto na área de estudo, a variação das Unidades Hidroestratigráficas que compõem o SAG, bem com a presença e disposição das estruturas tectônicas, influenciam nas variações das características hidrogeológica do aquífero.

3.4.2. Caracterização hidrogeológica do SASG

O Sistema Aquífero Serra Geral é caracterizado pelas rochas vulcânicas fraturadas, associadas a estruturas tectônicas, ocupando uma área, segundo Hausman (1995), de 137.000 km² no RS, com seu limite no estado se encontrando próximo da borda sul da Bacia do Paraná.

Por conta da baixa porosidade e permeabilidade primária que as rochas desse sistema aquífero possuem, a disponibilidade de água se torna intrinsecamente dependente da existência, bem como da geometria das estruturas presentes nessas rochas.

Para Hausman (1995), apesar de as rochas vulcânicas apresentarem fissuras e fraturas, apenas a segunda é capaz de permitir a circulação de água, visto que esta apresenta aberturas maiores, variando de 0,1 mm a até alguns centímetros, podendo apresentar extensões que chegam a centenas de quilômetros.

Para Reginato e Strieder (2004a) o sistema aquífero fraturado é condicionado principalmente por morfoestruturas, representadas por lineamentos de diferentes portes, com a circulação de água ocorrendo através do sistema de fraturas, podendo estar ou não conectadas entre si. Reginato e Strieder (2006a), indicam, porém, que a existência dessas estruturas não necessariamente garante a formação de aquíferos fraturados, visto que estas podem estar preenchidas por minerais, como zeolitas e sílica (quartzo microcristalino e calcedônia), sendo o primeiro mais comum nas rochas basálticas, enquanto o segundo nos riolitos e riodacitos.

Segundo Fernandes (2008), os basaltos apresentam ainda feições de resfriamento sub-horizontais, o que pode influenciar no aumento das produtividades, porém, estas tendem a se apresentarem fechadas em profundidades elevadas.

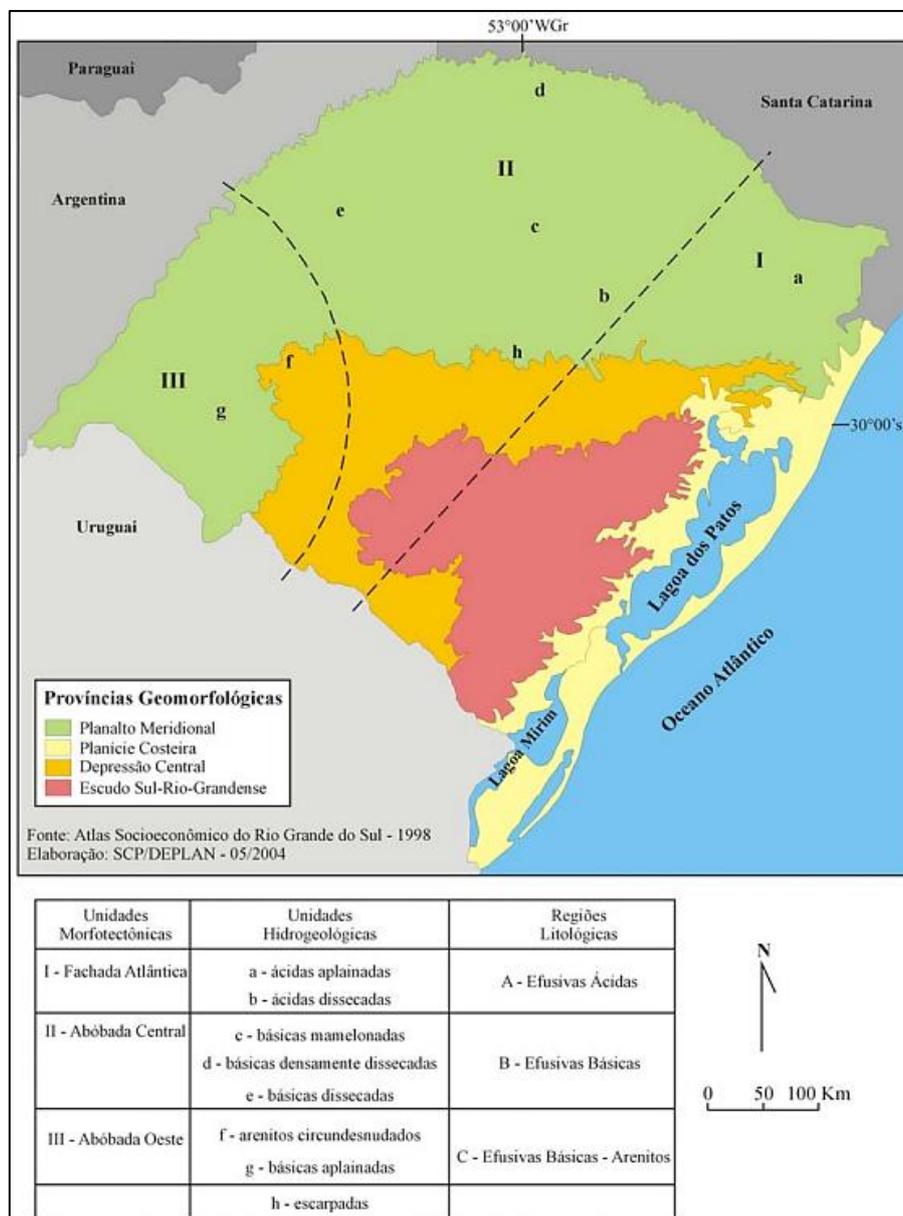
Para Nanni (2008), o fluxo de água no SASG também ocorre através de descontinuidades existentes entre os derrames. Além disso, segundo Freitas et al. (2016) e

Bongiolo et al. (2014), a circulação de água tende a se ampliar pela presença de disjunções horizontais e de zonas vesiculares e amigdaloides, além de intertraps.

Por conta das diferenciações entre as estruturas primárias encontradas nos derrames de rochas ácidas e básicas, para Reginato e Strieder (2006a), a presença de uma ampla zona vesicular e amigdalóide proporciona aos derrames básicos maiores chances quanto a ocorrência de águas subterrâneas.

Lisboa (1993) subdividiu o SASG no estado do Rio Grande do Sul em oito províncias hidrogeológicas (Figura 15), utilizando como base as características geomorfológicas, onde cada uma delas possuem características morfoestruturais e litológicas distintas.

Figura 15 - Províncias hidrogeológicas da Formação Serra Geral no RS.

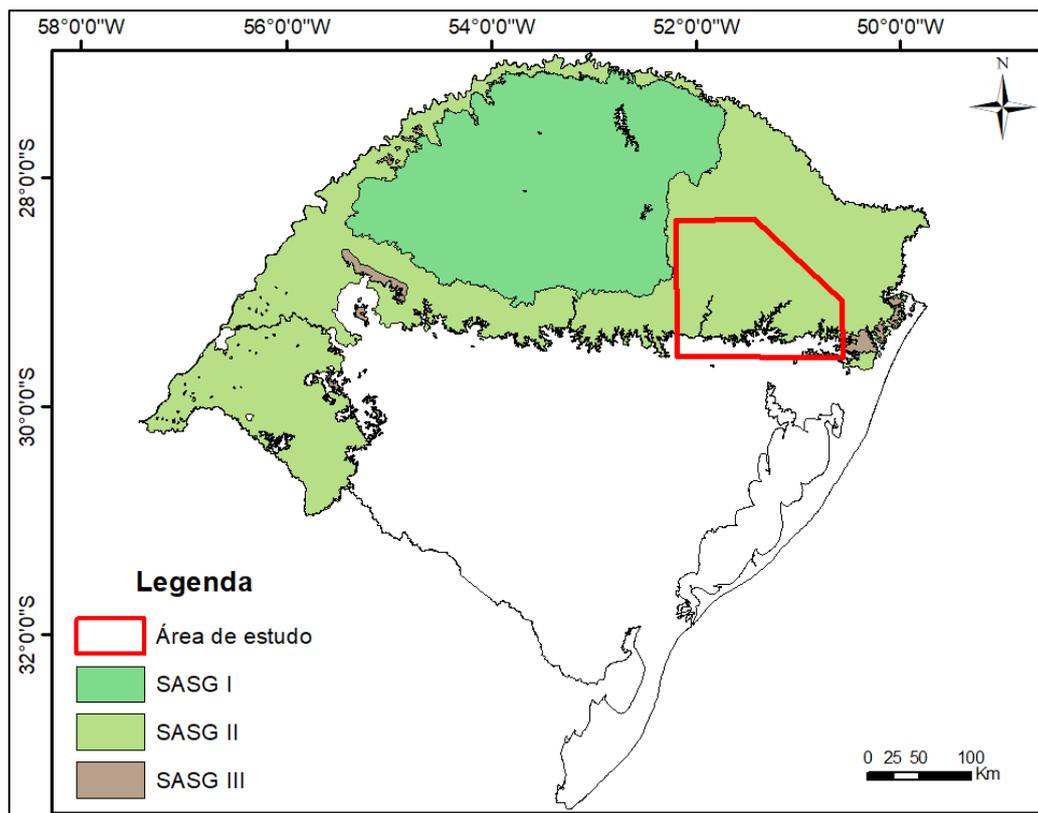


Fonte: Machado (2005a), adaptado de Lisboa (1996).

A área de estudo abrange as províncias hidrogeológicas ácidas aplainadas e ácidas dissecadas, com a primeira sendo caracterizada, segundo Lisboa (1996), pela presença de lineamentos de médio e pequeno porte com orientação principal à nordeste, com relevo pouco dissecado e um manto de alteração com espessura média que, em conjunto com a estruturação, proporciona um bom potencial aquífero, em especial quando relacionadas a lineamentos de médio porte. Já as ácidas dissecadas também apresentam lineamentos de pequeno e médio porte, porém esses últimos se encontram fragmentados pelo alto grau de dissecação do relevo, com direção preferencial para nordeste, apresentando um baixo potencial hidrogeológico.

No estado do RS, segundo Machado e Freitas (2005), o SASG está dividido em Sistema Aquífero Serra Geral I, II e III, com a área de estudo abrangendo apenas os dois últimos (Figura 16).

Figura 16 - Divisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Serra Geral no RS.



Fonte: Adaptado de Machado e Freitas (2005).

O SASG I é caracterizado por aquíferos de alta a média possibilidade de águas subterrâneas, com capacidades específicas muito variáveis, visto que existem poços improdutivos próximos de outros com excelentes vazões. Predominam poços com

capacidades específicas entre 1 e 4 m³/h/m, com existência de poços com maiores produtividades.

No SASG II, as possibilidades de águas subterrâneas não são tão elevadas, variando de média a baixa, com capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m. As exceções são em áreas mais fraturadas ou com arenitos na base do sistema, onde são encontrados valores superiores a 2 m³/h/m.

Composto por aquíferos praticamente improdutivos, o SASG III é encontrado nas porções mais elevadas dos derrames na região litorânea e em morros isolados em áreas mais dissecadas. O fraturamento da rocha, mesmo quando intenso, se encontra descontínuo, dificultando a formação de aquíferos produtivos.

Segundo Reginato (2003) o SASG na região NERS, na porção correspondente ao SASG II, é caracterizado por uma grande variabilidade hidrogeológica, o que lhe confere um alto grau de anisotropia, com valores baixos de transmissividade, capacidade específica e vazão, com 72,1% dos poços apresentando vazões menores que 10 m³/h, enquanto apenas 9,3% apresentaram vazões superiores a 20 m³/h.

Reginato et al. (2010) avaliou as características hidrodinâmicas de dois grupos de aquíferos fraturados na região NERS, denominados de SGF1 e SGF2, que se diferenciam pela correlação ou não dos poços produtivos com os lineamentos traçados. No SGF1, onde existe essa correlação, o aquífero é condicionado pelas estruturas tectônicas (fraturas e zonas de fraturas), enquanto no SGF2, sem correlação, o condicionamento se dá através das estruturas primárias. As características hidrodinâmicas referentes ao SGF1 indicam valores maiores de transmissividade, capacidade específica e vazão para esse tipo de aquífero.

Freitas et al. (2012) verificaram na região NERS que as capacidades específicas variaram de 0,004 a 6,6 m³/h.m, com média de 1,4 m³/h.m, consideradas pelos autores como altas, levando em conta que se trata de um meio fraturado. Além disso, as maiores vazões foram encontradas nas áreas com alta densidade de lineamentos e nas proximidades de grandes lineamentos com direções preferenciais NW e NE.

Nessa região, para Reginato e Strieder (2006b) existe uma relação entre as vazões dos poços e as direções dos lineamentos. Segundo os autores, as vazões no intervalo de 10 a 20 m³/h possuem maior associação com os lineamentos de orientação NE, enquanto que vazões acima de 20 m³/h possuem maior relação com lineamentos NW. Os valores encontrados acima de 20 m³/h, estão relacionadas aos lineamentos com direções principais NW (N30-60W), NE (N20-30E e N40-50E), N-S (N10-14E) e E-W (N80-90W). Já a análise dos poços

nulos mostra que eles foram verificados em todas as direções principais (N-S, NW, NE e E-W), além de locais onde eles não estavam associados a estruturas.

Segundo Bortolin (2014), em Carlos Barbosa a capacidade específica apresentou uma grande variação, típico de aquíferos anisotrópicos como o SASG, ficando na sua maioria entre 0 e 1 m³/h/m. Para o autor, os poços que apresentaram maiores capacidades específicas são aqueles relacionados com áreas de maior densidade de lineamentos, com orientação principal noroeste (NW), demonstrando a existência de um controle estrutural associado. As vazões do SASG apresentaram valores, na sua maioria, entre 0 e 20 m³/h.

Por conta da anisotropia do SASG, têm-se verificado nos poços que captam água desse sistema a existência de entradas de águas em diferentes níveis de profundidade ao longo da sua área de abrangência.

Hausmann (1995) indica que devido às pressões litostáticas a circulação de água pelas fraturas começa a diminuir a partir dos 140 m de profundidade, se tornando muito difíceis de serem encontradas em profundidades superiores a 300 m. Freitas et al. (2012), por exemplo, verificaram na região NERS que as entradas do SASG, apesar de casos com profundidades que chegaram a 265 m, na sua maioria se encontram em profundidades menores que 120 m.

Reginato e Strieder (2004a) verificaram na região NERS que em 82,6% dos poços existem até duas entradas de água, com 14,5% para três entradas e raros casos de poços com quatro entradas de águas. A profundidade das entradas de água desses poços variou entre 10 e 70 m.

Nessa região, Reginato (2003) verificou que a profundidade média dos poços produtivos é de 110 m, enquanto os poços nulos apresentam profundidades mais elevadas, em torno de 150 m. Segundo Bortolin et al. (2014), as entradas de águas do SASG na região estão, em geral, localizadas entre 20 e 100 m de profundidade, com ocorrência de casos com mais de 100 m de profundidade. Quanto ao nível estático, o autor verificou que este se encontra, na maior parte dos casos (66,4%), entre 0 e 10 m de profundidade, com 16,4% estando entre 10 e 20 m, e em raros locais maiores que 20 m.

Segundo Freitas (2016), em aquíferos fraturados as vazões possuem relação direta com o posicionamento das descontinuidades abaixo do nível estático, no sentido de aumento das vazões com o aumento dessa distância, demonstrando uma importância maior para o posicionamento das descontinuidades do que para a profundidade do poço. Além disso, para o autor, normalmente as descontinuidades tendem a desaparecer com o aumento das profundidades em razão das fortes pressões litostáticas, proporcionando uma queda na produção dos poços.

Segundo Bortolin et al. (2016), a circulação de água do SASG no município de Carlos Barbosa é condicionada por fraturas e estruturas de resfriamento dos derrames de rochas vulcânicas, de modo que a circulação ocorre em diferentes profundidades, o que pode influenciar nas características hidroquímicas das águas. Para Bortolin et al. (2014), o fato de casos em que os níveis estáticos nessa região estão posicionados, próximos da superfície, e em geral, acima das entradas de água, indicam que a circulação de água nesse sistema de fraturas ocorre sob pressão.

A espessura das rochas vulcânicas que compõem o SASG apresenta uma grande variação na área de estudo, proporcionando diferentes graus de confinamento para o SAG. Hindi (2007), considera que o grau de confinamento para o estado do Paraná varia em função do topo do SAG, definindo como baixo confinamento até 300 m de profundidade, médio entre 300 m e 600 m, e alto acima de 600 m, além de apresentar um comportamento de aquífero livre na região de afloramento.

3.5. Caracterização hidroquímica

A água é um dos mais importantes solventes encontrados na natureza, e por esse motivo apresenta uma grande facilidade em agregar em sua composição outras substâncias, sejam elas orgânicas ou inorgânicas. Por esse motivo, segundo Gastmans e Kiang (2005), as características químicas da água de um aquífero são resultantes da interação que a água, proveniente da precipitação, tem com o meio pelo qual ela percola e se armazena.

A interação da água com o solo e as rochas faz com que, a partir de reações químicas, essa água incorpore íons provenientes desses meios, enriquecendo-se em sais minerais (SANTOS, 2000). Além disso, essa água após armazenada pode ficar sujeita a influência de agente antrópicos, bem como da água proveniente de outros sistemas, como rios, lagos ou outros aquíferos.

Segundo Arraes e Campos (2007), as concentrações de sais estão relacionadas com o sistema de fluxo, de modo que em fluxos locais, onde as áreas de recarga e descarga são próximas, as águas tendem a ser menos mineralizadas, mais jovens, enquanto que em fluxos regionais, em função do maior tempo de residência, elas são mais mineralizadas. Gastmans (2007) verificou que a condutividade elétrica (CE) tende a aumentar ao longo das principais direções de fluxo, o que reflete uma crescente mineralização da água.

3.5.1. Hidroquímica do SAG

O SAG, por apresentar uma heterogeneidade quanto as litologias das rochas sedimentares que o compõe, proporciona uma grande variação de grupos hidroquímicos (BONGIOLO et al., 2014).

Segundo Silva (1983), a evolução hidroquímica das águas do Aquífero Botucatu no estado de São Paulo é determinada pelas condições de confinamento do aquífero, pelas direções e sentidos dos fluxos de água subterrânea e pelo tempo de residência das águas, com uma tendência ao enriquecimento dos sais desde a área de recarga até a região de forte confinamento do aquífero.

Para Araújo et al. (1999), as águas do SAG são predominantemente de três tipos, bicarbonatada cálcica, bicarbonatada cálcica ou magnésiana e bicarbonatada sódica. Porém, há também a presença de classes como as bicarbonatada magnesianas, as cloro-sulfatadas e as sulfatadas sódicas. Para Gastmans (2007), na porção noroeste da Bacia do Paraná, o enriquecimento dessas águas em cloreto e sulfato podem ter relação com aquíferos sotopostos ao SAG, enquanto magnésio pode ter origem nas águas do SASG.

Gastmans e Kiang (2005), por exemplo, ao avaliar a hidroquímica do SAG no Mato Grosso (MT), verificaram que as águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas, e de forma secundária bicarbonatada sódica. Na porção aflorante do SAG as águas são bicarbonatadas cálcicas, enquanto o SAG confinado apresentou águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com tendência de aumento do magnésio, o que pode estar relacionado com a contribuição dos basaltos. Segundo os autores, as águas tendem a passar de bicarbonatadas cálcicas nas áreas de afloramento e recarga, ou pequeno confinamento, para águas bicarbonatadas sódicas em áreas de maior confinamento.

Segundo Kimmelman et al. (1986) as águas do Aquífero Botucatu nos estados de Goiás, Mato Grosso, Paraná e São Paulo registram um aumento nas concentrações de sais, no pH e na temperatura, no sentido do confinamento do aquífero, com essas águas evoluindo de bicarbonatada cálcica e/ou mista na borda da bacia, para bicarbonatada sódica na parte central.

Isso demonstra um pouco sobre a grande variabilidade que o SAG possui quanto as suas características hidroquímicas, apresentando alterações nas concentrações dos íons que formam essa água, neste caso, por influência das águas provenientes dos aquíferos fraturados sobrepostos a eles, ou de aquíferos sotopostos, além do aumento no grau de confinamento.

Segundo Hindi (2007), as concentrações de cálcio e magnésio tendem a diminuir com o aumento do grau de confinamento, acompanhadas pelo aumento nas concentrações de sódio. Para Bongioiolo et al. (2014), em área de alto confinamento do SAG, as águas podem apresentar sólidos dissolvidos totais superiores a 1000 mg/l, altas concentrações de sulfato, e fluoreto acima de 12 mg/l. Gastmans (2007) verificou que com o aumento do confinamento houve um incremento na alcalinidade e um aumento proporcional nas concentrações de cálcio até o ponto onde houve a saturação da calcita. A partir desse patamar, com o aumento da alcalinidade, as concentrações de cálcio diminuíram e as de sódio aumentaram.

Reginato et al. (2013) observaram na região NERS a presença de águas do SAG de diferentes classes hidroquímicas, como a das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, a das bicarbonatadas sódicas, e a das sulfatadas ou cloretadas sódicas. Os autores indicaram que essa variabilidade química tem relação com o grau de confinamento do SAG nessa região, visto que as águas do primeiro grupo foram encontradas em locais com menor espessura de rochas vulcânicas, inferiores a 80 m, enquanto nos demais grupos as espessuras são superiores a 100 m. Foi verificado também nessas águas valores mais elevados de pH (7,9 a 9,6), e condutividade elétrica (270 a 686 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Giardin e Faccini (2010), na porção superior da região NERS, verificaram que as concentrações de sais totais do Aquífero Botucatu variaram de 800 a 2000 mg/l. Em Erechim essa variação ocorreu no sentido do topo para a base, indicando uma concordância com o grau de confinamento, enquanto em Machadinho as concentrações se mantiveram constantes, na faixa dos 800 mg/l, ao longo de todo o pacote.

Na região de Estrela, Giardin e Faccini (2011) identificaram que as águas do Aquífero Botucatu são do tipo bicarbonatada cálcica, com pH próximo do neutro (6,9), e com os sólidos dissolvidos totais (SDT) e alcalinidades menores do que as encontradas nas águas do Aquífero Passo das Tropas, que possui águas bicarbonatadas sódicas, e pH de 9,9.

O aumento no grau de confinamento, segundo Bongioiolo et al. (2014), tende a elevar a temperatura das águas do SAG no Paraná, na forma de gradiente geotérmico, em uma proporção de 1 °C para cada 35 m de profundidade. Essa mesma tendência também foi identificada por Gastmans (2007) para a porção noroeste da Bacia do Paraná, só que com um gradiente geotérmico um pouco menor, de 1 °C para cada 40 m de profundidade do topo do SAG.

Na região NERS Giardin e Faccini (2010) utilizaram a termometria e a hidroquímica para identificar a existência de barreiras de fluxo. Segundo os autores, na porção localizada a nordeste dos Lineamentos Rio das Antas (LRA) e Rio Forqueta (LRF), foram encontradas

águas hiper e hipotermiais (28,6 a 46,7 °C), enquanto ao sul as águas são consideradas frias (19 a 21 °C).

Ao norte da área de estudo, na região de Cotiporã, Nova prata, Veranópolis e Nova Bassano, Freitas et al. (2004) verificaram a potencialidade da região para águas termais, encontrando temperaturas que variam entre 33 e 41 °C.

3.5.2. Hidroquímica do SASG

Com base nos estudos hidroquímicos desenvolvidos em toda a Bacia do Paraná por diversos autores, como Lisboa (1996), Bittencourt et al. (2003), Machado (2005a), Portela Filho et al. (2005), Ferreira et al. (2005), Boff et al. (2006), Manasses et al. (2007) e Bongiolo et al. (2014), foi possível definir que as águas provenientes do SASG são principalmente do grupo das bicarbonatadas, com predomínio das bicarbonatadas cálcicas, e secundariamente das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e das bicarbonatadas sódicas.

De acordo com autores como Bittencourt et al. (2003), Ferreira et al. (2005), Athayde et al. (2007), Manasses et al. (2007), Lastoria et al. (2007), Nanni (2008), Freitas et al. (2011), Freitas et al. (2012), Reginato et al. (2013) e Bongiolo et al. (2014), a presença de águas do SASG classificadas como bicarbonatadas sódicas, sulfatadas sódicas, sulfatadas ou cloretadas sódicas, ricas em cloreto, sulfato e sódio, sugerem a influência de águas de Unidade Hidroestratigráficas sotopostas, como as que formam o SAG, ou em alguns casos, até mesmo unidades mais basais, referentes ao pré-SAG.

Segundo Lisboa (1996), as águas do SASG tendem a apresentar uma relação $Ca > Mg > Na$, onde as concentrações de Ca e Mg e a mineralização das águas aumentam no sentido do topo, onde estão os derrames ácidos, para a base, nos derrames básicos. Já as águas com características sódicas apresentam diferenciação nas diferentes profundidades relacionadas com controladores geológicos, com possível influência de águas do Aquífero Botucatu.

Segundo Bittencourt et al. (2003), os basaltos apresentam baixos teores de sulfeto e outras formas de enxofre, refletindo em menores concentrações sulfato nos aquíferos fraturados, com a existência de concentrações mais elevadas podendo indicar uma origem externa ao SASG, como por exemplo, uma influência pelas águas do SAG.

Para Athayde et al. (2014), a conectividade entre o SAG e o SASG no Paraná, pode ser inferida a partir da análise dos dados físico-químicos e potenciométricos de poços perfurados

nesses sistemas aquíferos. Segundo os autores, uma potenciometria favorável, com os níveis do SAG se posicionando acima daqueles relativos ao SASG, em conjunto com a existência de estruturas tectônicas que permitam essa conexão, bem como águas com um enriquecimento em sódio, cloreto, sulfato, carbonato, temperaturas e pH elevados, podem indicar misturas de água. Nesse mesmo sentido, Gastmans (2007) também indica que esse aumento das concentrações de cloreto e sulfato nas águas do SASG possui relação com aquíferos sotopostos.

Freitas (2016) analisou as condutividades elétricas de 7.620 poços no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Para o autor, os valores mais comuns para o SASG ficam entre 117,35 e 378,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e que valores maiores e menores que esses são considerados anômalos. Na classe denominada C1, de condutividade anômalas, acima de 378,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$, foram encontradas águas predominantemente sulfatadas ou cloretadas sódicas e bicarbonatadas sódicas, além de casos com águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e sulfatadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas, indicando águas mais antigas.

Complementando a pesquisa, o autor utilizou os locais onde foram identificados valores anômalos de condutividade elétrica no SASG, acima de 378,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para relacionar a profundidade do poço com a potenciometria do SAG, de modo que os locais onde a cota da base do poço se encontrava abaixo da superfície potenciométrica do SAG foram considerados sob influência da recarga ascendente, de aquíferos sotopostos.

Segundo Machado e Freitas (2005), águas do SASG com elevados valores de pH (entre 9 e 10), salinidade e sódio, podem ser encontradas em áreas onde há ocorrência de descargas ascendentes do SAG.

Segundo Teixeira e Viero (2017), na região oeste do RS, por conta das fracas interações água-rocha, as águas do SASG possuem baixa salinidade, com exceção de locais onde ocorrem a presença de amígdalas preenchidas por calcita, ou por influência de águas de aquíferos sotopostos. Para os autores, a dissolução da calcita das amígdalas tende a aumentar as concentrações de cálcio e bicarbonato, enquanto o aumento de sódio e outros íons podem ter relação com águas de outros aquíferos. Os autores sugerem ainda que uma possível fonte para as concentrações elevadas de sódio, fluoreto, cloreto e sulfato é a Formação Irati, que se encontra estratigraficamente abaixo das Formações que compõem o SAG na região.

Na região do alto rio Uruguai, na divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Freitas et al. (2011) analisaram as águas provenientes de fontes naturais (surgências em fraturas em vales com até 230 m de altitude) e artificiais (poços próximos às áreas de surgência), encontrando águas que variam de hipo à hipertermais, com temperaturas,

respectivamente, de 30 a 33,3 °C, e de 30 a 38 °C. Foram encontrados três grupos hidroquímicos, com águas sulfatadas, mistas e bicarbonatadas, do tipo sódicas, com elevadas condutividades elétricas (acima de 650 µS/cm). Segundo o autor, essa classificação encontrada, semelhante à das águas encontradas no SAG, sugere interconexão entre os aquíferos. Além disso, os casos com altas concentrações de Cl e SO₄ podem indicar a possibilidade de conexão com aquíferos ainda mais profundos, abaixo do SAG.

Segundo Mancuso et al. (2014), no noroeste do RS as águas encontradas em poços do SASG são consideradas, em sua maioria, como águas frias, com temperaturas menores que 25 °C, com alguns casos de águas hipotermiais, com temperaturas chegando a até 32 °C. Essas temperaturas mais elevadas estão localizadas principalmente na região mais próxima do Rio Uruguai, e podem ter relação com águas provenientes do SAG.

Como as águas do SASG apresentam, em geral, temperaturas menores que as do SAG, sendo consideradas como águas frias, segundo a classificação de Brasil (1945), a presença de valores mais elevados se mostra uma opção quanto ao indicativo de locais onde possa estar ocorrendo misturas de águas entre os aquíferos.

Segundo Hausman (1995), as águas do SASG tendem a aumentar a sua mineralização com o aumento da profundidade das fraturas produtoras. Os poços com entradas de águas em profundidades menores que 150 m tendem a apresentar pH entre 6,5 e 7,9, com uma tendência de aumento em profundidades maiores. Além disso, também foram verificados nesse sentido um aumento dos SDT e do sódio.

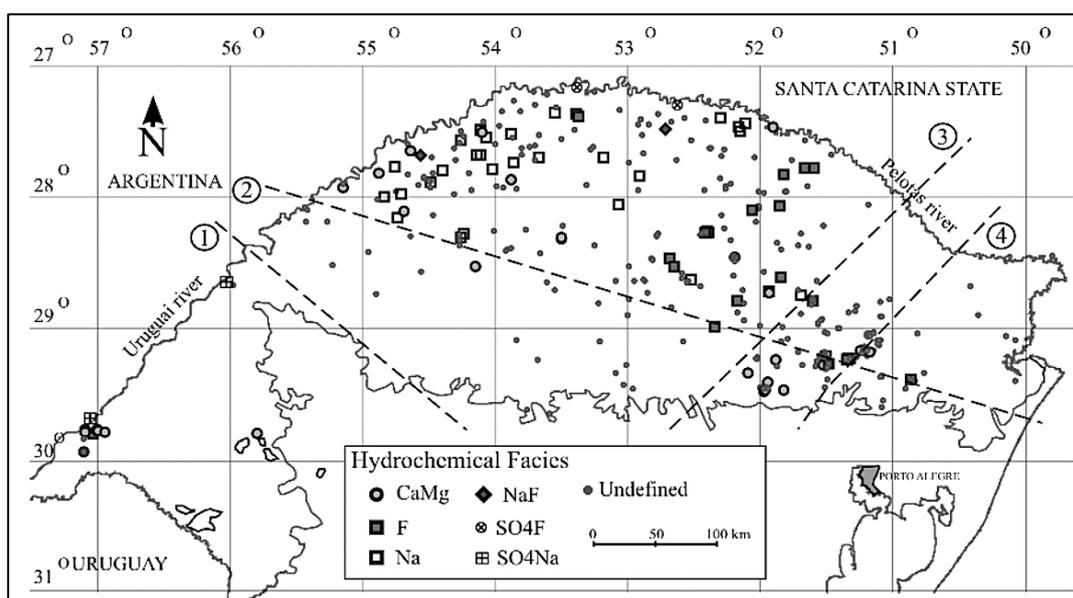
Ferreira et al. (2005) relacionaram, na região central do Arco de Ponta Grossa, a profundidade das entradas de água com a variação na hidroquímica das águas. Enquanto em poços com entradas de águas mais superficiais foram encontradas águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, nos poços com profundidades um pouco maiores, em torno de 60 m, as águas são bicarbonatadas cálcicas. Em profundidades próximas de 70 m as águas são bicarbonatadas cálcico-sódicas, com presença de águas bicarbonatadas sódicas em entradas de águas abaixo dos 80 m.

Essa tendência também foi identificada por Portela Filho et al. (2005), que nessa mesma região verificaram que as águas do tipo bicarbonatada sódica estão relacionadas com as entradas de água mais profundas, enquanto as águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas recebem contribuições mais superficiais.

Nanni et al. (2009), definiram 6 fácies hidroquímicas do SASG no Rio Grande do Sul (Figura 17). A Fácies CaMg representa as águas bicarbonatadas cálcicas, onde o Mg²⁺ aparece elevado em mais 50% dos poços, a Fácies Na representa as águas bicarbonatadas sódicas, a

fÁCIE F abrange as águas bicarbonatadas e sulfatas com o íon de fluoreto sendo um componente principal. Além dessas, há as Fácies SO₄F (sulfatada sódica com ocorrência restrita de fluoreto), SO₄Na (sulfatadas com temperaturas mais elevadas e altas concentrações de fluoreto), e NaF (similar a Fácies Na, mas com concentrações mais elevadas de fluoreto). Verifica-se na área de estudo que as principais Fácies encontradas foram as CaMg e F, porém, boa parte das águas não foram enquadradas em nenhuma das classes, sendo denominadas como indefinidas. Além disso, os autores indicam que as concentrações anômalas de Flúor podem ter relação com a recarga ascendente.

Figura 17 - Fácies hidroquímicas do SASG identificada no RS.



Fonte: Nanni (2008).

Reginato et al. (2004b) verificaram na caracterização hidroquímicas das águas dos aquíferos fraturados na região NERS a existência de três campos principais, o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (80,1%), das bicarbonatadas sódicas (18,4%) e das sulfatadas cálcicas ou magnesianas (1,4%). Segundo os autores, as águas do primeiro tipo apresentam relação com a litologia das rochas que hospedam o sistema aquífero fraturado, enquanto os demais tipos podem estar sofrendo influência das águas provenientes de aquíferos sotopostos. Vale ressaltar que as águas sulfatadas cálcicas ou magnesianas foram identificadas em apenas dois dos onze municípios analisados (Veranópolis e Nova Roma do Sul).

Reginato et al. (2013) indica que as águas do SASG na região NERS são, em geral, bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com CE menores que 200 μ S/cm e pH menores que

7,5, e que as águas bicarbonatadas sódicas e sulfatadas cálcicas podem ter relações com a recarga ascendente do SAG.

Boff et al. (2006) realizaram um estudo hidroquímico em 19 poços de água mineral nos municípios de Caxias do Sul, Flores da Cunha, São Marcos, Ipê e Antônio Prado. Os autores verificaram a existência de uma relação entre os parâmetros físico-químicos e as rochas hospedeiras, que nesse caso eram de derrames ácidos. Foram encontradas águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (88%) e Bicarbonatadas sódicas (12%).

Segundo Bortolin et al. (2016), as características hidroquímicas das águas do SASG, relacionadas às rochas ácidas, podem apresentar variações em função das profundidades das entradas de água. Os autores encontraram concentrações médias de cálcio de 13,71 mg/l, bicarbonato variando de 5,49 a 97,6 mg/l, pH ácidos (4,89 a 6,67), SDT de 64 a 161 mg/l, sódio de 4,81 a 15,74 mg/l, sulfato menor que 4 mg/l, potássio entre 0,92 e 7,13 mg/l, CE de 98 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com as águas sendo classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. Ainda conforme os autores, poços com entradas de águas menos profundas apresentaram menores concentrações nos íons analisados, bem como águas mais ácidas, por efeito da circulação mais rápida. Já os poços com entradas de águas mais profundas, devido ao maior tempo de residência, as águas apresentaram maiores concentrações nos íons.

Segundo Freitas et al. (2016), a área de estudo está inserida a zona de condutividade elétrica anômala Taquari/Antas. O controle estrutural dessa zona está relacionado a feições NW, NE e EW, sendo as principais o Lineamento do Rio das Antas (N70E), o Sistema de Falhas Lajeado-Esteio (N60W), Zona de Falhas Blumenau-Soledade (N65E), Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (N40E), o Sistema de Falhas Nordeste (NE), e o Lineamento Bento Gonçalves (E-W). Os poços anômalos apresentam CE entre 379 e 1.325 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média de 518,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e mediana de 438 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.5.3. Principais características isotópicas do SAG e do SASG

O isótopo de um elemento é uma variação deste elemento, mas com diferente número de nêutrons. Na hidrogeologia, os isótopos estáveis são aplicados principalmente na avaliação da origem das águas, das condições de fluxo subterrâneo e nos estudos de interações entre as águas de diferentes aquíferos (FEITOSA, 1997). Os isótopos mais utilizados nos estudos hidrogeológicos são o oxigênio 18 (^{18}O) e o deutério ($\delta^2\text{H}$), variações, respectivamente, dos elementos oxigênio (^{16}O) e hidrogênio.

Para Hiscock (2005), com a utilização do espectrômetro de massa é possível determinar a razão isotópica em amostras de água, através das alterações que ela apresenta. As razões $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$ das amostras podem ser comparadas com as razões padrões referentes ao Vienna Standard Mean Ocean Water – VSMOW, a partir das Equações 1 e 2. Segundo Fetter (2001) as razões $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ obtidas podem ser comparadas com a Reta Meteórica Mundial (RMM), de modo a compreender os processos de origem das águas analisadas.

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{Amostra}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Amostra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{Padrão}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰ VSMOW} \quad \text{Equação 1}$$

$$\delta^2\text{H}_{\text{Amostra}} = \left(\frac{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{Amostra}}}{(^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{Padrão}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰ VSMOW} \quad \text{Equação 2}$$

Segundo Silva (1983), o padrão isotópico do SAG é de -6,5‰ a -10,1‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e de -45‰ a -70‰ para $\delta^2\text{H}$. O $\delta^{18}\text{O}$ encontrado em regiões próximas ao aquífero livre são sempre superiores a -7,7‰, tornando-se mais empobrecidos à medida que aumenta o grau de confinamento, variando -8,2‰ -10,1‰, mas apresentando um enriquecimento na região de maior confinamento com valores entre -6,8‰ e -7,4‰. A autora atribuiu essa alteração na composição isotópica na região de maior confinamento a oscilações nas condições climáticas durante as precipitações que geraram as recargas do aquífero.

Em uma complementação do estudo anterior, para Kimmelman et al. (1986), a avaliação isotópica de oxigênio e deutério do Aquífero Botucatu nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo, indica uma origem da recarga pela precipitação. Os autores chegaram a esta conclusão em função do posicionamento das razões isotópicas próximas à Reta Meteórica Mundial. As razões isotópicas encontradas nessa região foram de -5,7‰ a -9,8‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e de -32‰ a -67‰ para $\delta^2\text{H}$, indicando um comportamento similar ao encontrado por Silva (1983). Para os autores, a presença de razões isotópicas mais positivas nas águas da zona de recarga no estado de Mato Grosso do Sul com relação a São Paulo, pode ter relação com a diferença entre a elevação topográfica entre as duas áreas, bem como variações climáticas e de latitude.

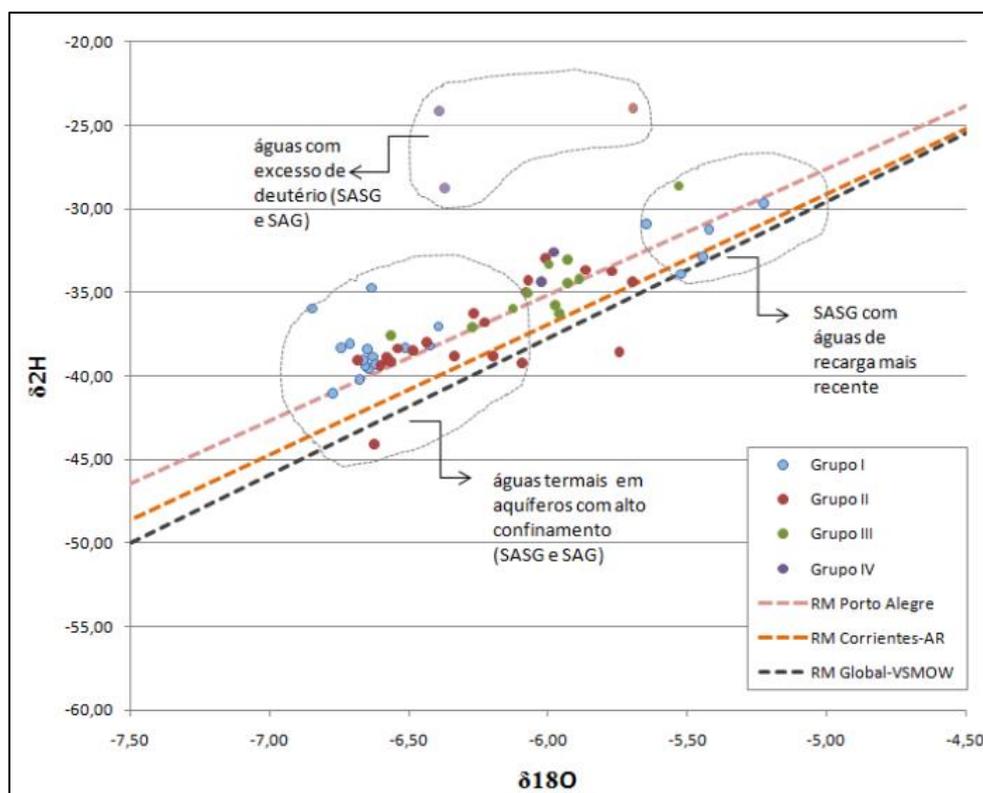
Segundo Gastmans et al. (2016), as razões isotópicas do SASG no estado de São Paulo, variaram de -37,8‰ a -61,3‰ VSMOW para $\delta^2\text{H}$, e de -5,7‰ a -8,9‰ VSMOW para $\delta^{18}\text{O}$. Ao comparar as assinaturas isotópicas das águas da chuva das retas meteóricas mundial e tropical brasileira, com a das águas subterrâneas, foi verificada uma similaridades entre elas,

com uma aproximação dos pontos referentes às razões isotópicas analisadas com as retas meteoricas, indicando a água de recarga do SASG teve origem nas águas meteoricas.

Estes autores identificaram ainda dois grupos de razões isotópicas, com o primeiro grupo apresentando $\delta^{18}\text{O}$ menor que $-8,9\text{‰}$ VSMOW, próximo ao padrão encontrado para as águas do SAG na região ($\delta^{18}\text{O} \approx -8,0\text{‰}$ VSMOW), enquanto no segundo grupo a variação foi de $-5,8\text{‰}$ a $-7,5\text{‰}$ VSMOW, similar as águas de precipitação nos dias atuais. Essas diferenças indicam que as recargas ocorreram sobre diferentes condições climáticas.

Freitas (2016) analisando as características isotópicas de oxigênio e deutério na região do Alto Rio Uruguai verificou que $\delta^2\text{H}$ variou de $-23,97\text{‰}$ a $-44,09\text{‰}$ para as águas do SAG, e de $-24,16\text{‰}$ a $-39,54\text{‰}$ para o SASG, já $\delta^{18}\text{O}$ variou de $-5,69\text{‰}$ a $-6,84\text{‰}$ nas águas do SAG, e de $-5,22\text{‰}$ a $-6,74\text{‰}$ para o SASG. Os poços dispostos na zona de maior depleção, representados pelo SAG de alto confinamento e o SASG termal, são consideradas como águas mais antigas, enquanto os menos empobrecidos em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ correspondem ao SASG não termal, com águas provenientes de recargas meteoricas mais recentes. Três poços, sendo dois do SASG e um do SAG, apresentaram excesso de deutério, possivelmente pelas condições extremas de evaporação da água na ocasião da recarga dos aquíferos (Figura 18).

Figura 18 - Diagrama para as razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para água do SAG e SASG na região do Alto Rio Uruguai.



Fonte: Freitas (2016).

Para Nanni (2008), valores mais depletados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas do SASG, se aproximando das razões isotópicas do SAG, reforçam a importância das recargas ascendentes na dinâmica dos aquíferos. Outra tendência é que os valores para o SAG se tornam mais depletados de leste para oeste do RS, no sentido do fluxo subterrâneo. Segundo Nanni et al. (2013), as razões isotópicas do SASG variaram para $\delta^{18}\text{O}$ de -4,2‰ a -5,7‰, e $\delta^2\text{H}$ de -24‰ a -37‰, e as do SAG variaram para $\delta^{18}\text{O}$ de -4,8‰ a -5,5‰, e para $\delta^2\text{H}$ de -28‰ a -37‰.

Na região de Carlos Barbosa Bortolin (2014) verificou as razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para a água da chuva, fontes e poços tubulares perfurados no SASG. O autor verificou que as águas dessas três proveniências são estatisticamente semelhantes, indicando que a água subterrânea de poços com entradas de água em profundidades menores que 100 m pode ter origem na infiltração da precipitação nas áreas de recarga.

3.6. Compartimentação estrutural dos Sistemas Aquíferos

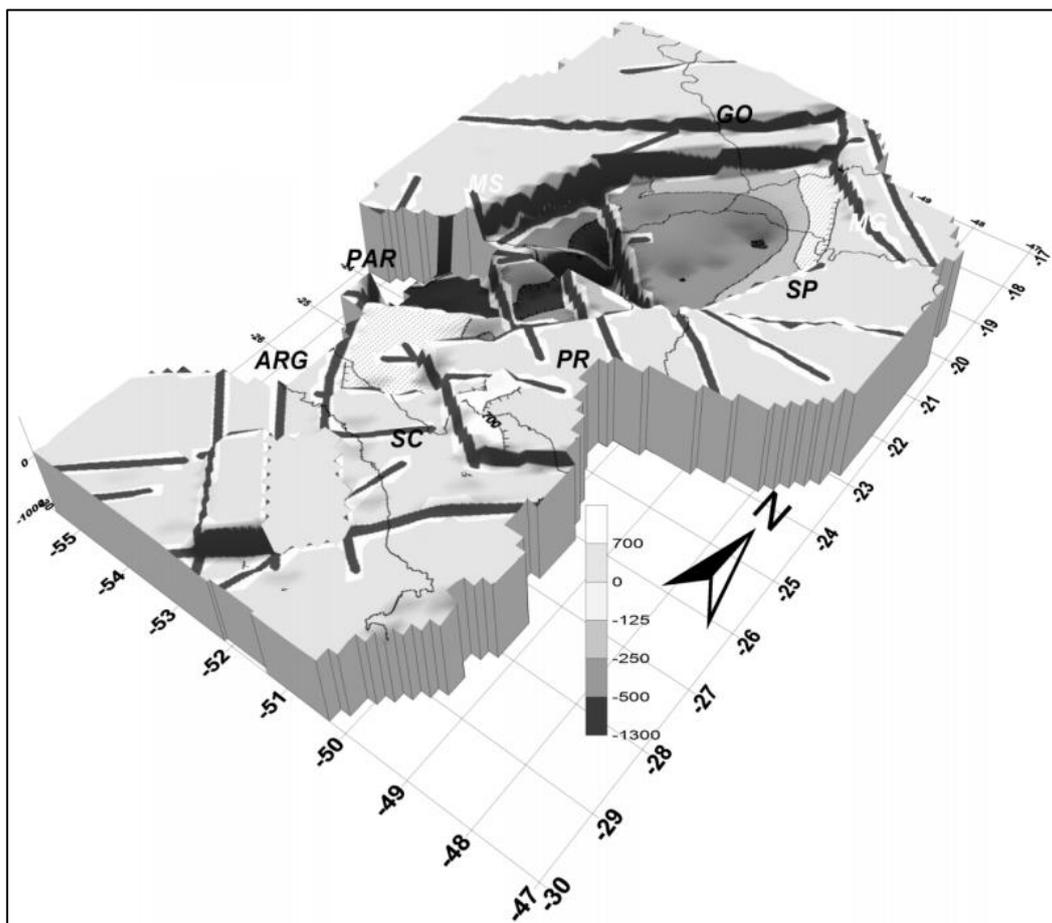
O forte controle estrutural e a grande variação das litologias que compõem o SAG e o SASG, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, influenciam diretamente na dinâmica desses aquíferos, podendo em alguns casos individualizar blocos estruturais, na forma de compartimentos, que podem não apresentar continuidade de fluxo de água subterrânea entre si. A seguir serão detalhados alguns estudos, apresentando diferentes abordagens empregadas na delimitação desses compartimentos, bem como de que forma isso atua na variação das características hidroquímicas e hidrogeológicas dos aquíferos.

As estruturas tectônicas são as principais responsáveis pela compartimentação dos aquíferos na Bacia do Paraná. Dentre elas pode-se destacar as falhas de médio e grande porte, e a presença de intrusões vulcânicas. Essas falhas podem provocar movimentos verticais nos blocos, causando um basculamento dos pacotes de rochas, o que, em alguns casos, pode causar a descontinuidade do fluxo de água subterrânea entre as áreas separadas por essas estruturas.

Soares et al. (2007a) utilizaram como base o traçado de lineamentos, bem como o contorno estrutural do SAG e a variação das espessuras das Formações Botucatu e Pirambóia, constituintes desse sistema aquífero, para avaliar a compartimentação estrutural da Bacia do Paraná. Os autores verificaram a existência de grandes blocos, altos e baixos, com presença de rejeitos significativos nos seus limites, com casos de blocos mais baixos em que as Unidades Hydroestratigráficas do SAG se encontram posicionadas lateralmente com o Aquicludo Rio do

Rasto, restringindo o fluxo de água. Destaca-se a utilização, pelos autores, dos lineamentos como barreiras nas interpolações espaciais, evidenciando dessa forma o basculamento dos blocos (Figura 19).

Figura 19 - Representação em 3D do mapa de contorno estrutural do topo da Formação Botucatu.



Fonte: Soares et al. (2007a).

Hindi (2007) verificou no Paraná a existência de falhas com rejeitos de até 500 m, o que proporcionou o posicionamento da Formação Botucatu em contato lateral com litologias do antigo Grupo Passa Dois (Formações Rio do Rasto, Teresina, Serra Alta, Irati), podendo dessa forma existir influência na composição química das águas. Foi verificado também casos em que os sistemas de falhamentos seccionam o aquífero em blocos, causando descontinuidade da camada aquífera.

Segundo Gastmans et al. (2017) o arcabouço geológico do SAG controla o fluxo de água subterrânea na Bacia do Paraná, com essas águas seguindo, regionalmente, do norte para o sul, separando a bacia em 4 domínios hidrodinâmicos NE, E, W e S, com os 3 primeiros

sendo separados do último em compartimentos por influência dos Arcos de Rio Grande e Assunção. Os autores chegaram a essa conclusão após verificarem uma significativa variação das características hidroquímicas e isotópicas do compartimento sul para os demais, mesmo a potenciometria indicando uma continuação de fluxo entre eles. No compartimento sul as águas do SAG apresentam menores evoluções hidroquímicas, muito por conta da possibilidade dos Arcos de Rio Grande e Assunção estarem funcionando como uma zona de recarga. Enquanto ao norte do arco as águas são do tipo Na-Cl-SO₄, com altas condutividades (maiores que 1500 µS/cm), na porção sul as águas são Ca-HCO₃ ou Na-HCO₃, e condutividade variando entre 300 µS/cm e 500 µS/cm.

A presença de intrusões magmáticas, na forma de diques e sills, como as que ocorrem principalmente no estado do Paraná, relacionadas ao Arco de Ponta Grossa, segundo Araújo et al. (1995a), podem funcionar como barreiras hidráulicas, condicionando os padrões de fluxo, e formando compartimentos.

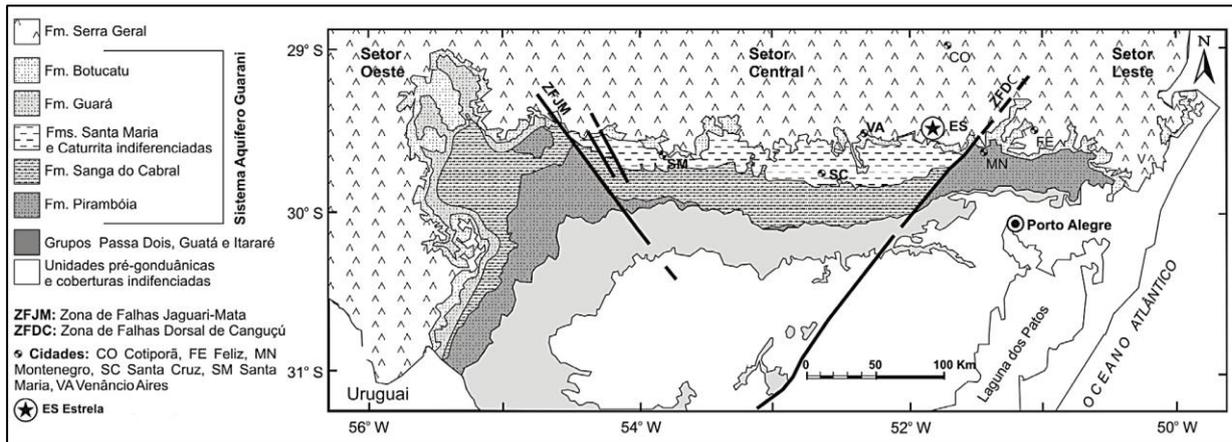
Toda essa compartimentação tende a influenciar nas características hidrogeológicas e hidroquímicas em cada bloco, como verificado por Ferreira et al., (2005) na região central do Arco de Ponta Grossa, onde as áreas de maior produtividade são balizadas por compartimentos formados por estruturas com direções NW-SE e NE-SW.

Athayde (2013) subdividiu o SASG no estado do Paraná em quatro compartimentos hidroestruturais, utilizando como base, além do arcabouço estrutural delimitado para a região, as informações de valores anômalos, acima do terceiro quartil, de vazões e capacidades específicas.

Giardin e Faccini (2010), verificaram que no RS a estratigrafia do SAG é condicionada pela tectônica, possuindo composições estratigráficas diferentes nos três blocos analisados, denominados oeste, central e leste, que se apresentam compartimentados por duas grandes estruturas, os Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu e Jaguari-Mata (Figura 20).

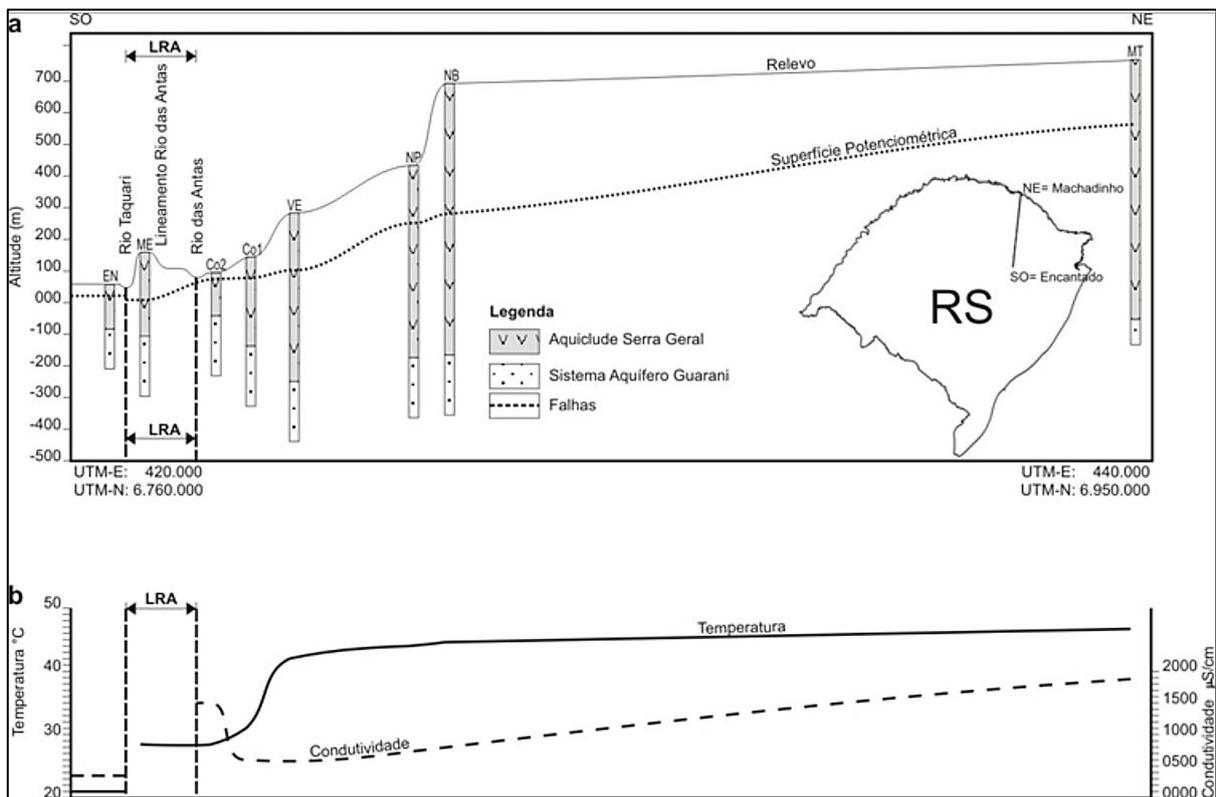
Os autores apresentaram diferentes metodologias para avaliar a compartimentação do SAG, influenciada por lineamentos. No sentido NE para SW no perfil de Machadinho à Encantado, verificou-se que a potenciometria não define as compartimentações produzidas pelos lineamentos, mas sim a hidroquímica e a termometria (Figura 21). O Lineamento Rio das Antas (LRA) marca o limite entre as águas hipotermiais e frias, e uma brusca mudança nas condutividades elétricas, sem mudança brusca na potenciometria. Já no caso do Lineamento Rio Forqueta (LRF) temos que a separação de blocos se dá pela ausência do Botucatu à oeste deste, com as rochas vulcânicas assentando-se sobre rochas pelíticas do Membro Alemoa da Formação Santa Maria.

Figura 20 - Compartimentação estratigráfica do SAG na área de afloramento no RS.



Fonte: Adaptado de Giardin e Faccini (2011).

Figura 21 - Individualização de compartimentos baseada na hidroquímica e na termometria.



Fonte: Giardin e Faccini (2010).

Na transição entre os setores central e leste, Giardin e Faccini (2011) verificaram que as falhas associadas ao Sistema de Falha Dorsal de Canguçu, provocam rejeitos verticais que podem ser superiores à espessura do Aquífero Botucatu, o que pode provocar uma compartimentação desse aquífero. Já as falhas NW apresentam rejeitos menores, não

comprometendo a continuidade hidráulica. Além desse fato, a ausência do Aquífero Botucatu também contribui para a formação de blocos improdutivos, evidenciando a atuação desses conjuntos de processos na compartimentação dos aquíferos.

Em Santa Maria-RS, por exemplo, Giardin e Faccini (2004), expõem o caso de estruturas NW que geraram rejeitos de algumas dezenas de metros, valor superior à espessura média do Aquífero Passo das Tropas, que compõem o SAG na região, o que provocou um condicionamento hidrogeológico. Em suma, a movimentação vertical desses blocos provocou nas suas bordas um desnivelamento dos pacotes de rochas, que por conta da sua magnitude fez com que esses pacotes que antes se encontravam um acima do outro, agora estavam posicionados lado a lado, e a presença de Unidade Hidroestratigráficas de baixa permeabilidade acabou funcionando como uma barreira hidráulica, compartimentando o aquífero.

Em um processo semelhante, nessa mesma região Wankler (2006) avaliou a compartimentação do Aquífero Passo das Tropas, identificando grandes lineamentos pós-deposicionais NW-SE e NE-SW, que influenciaram no basculamento de blocos, que compartimentaram o fluxo na região.

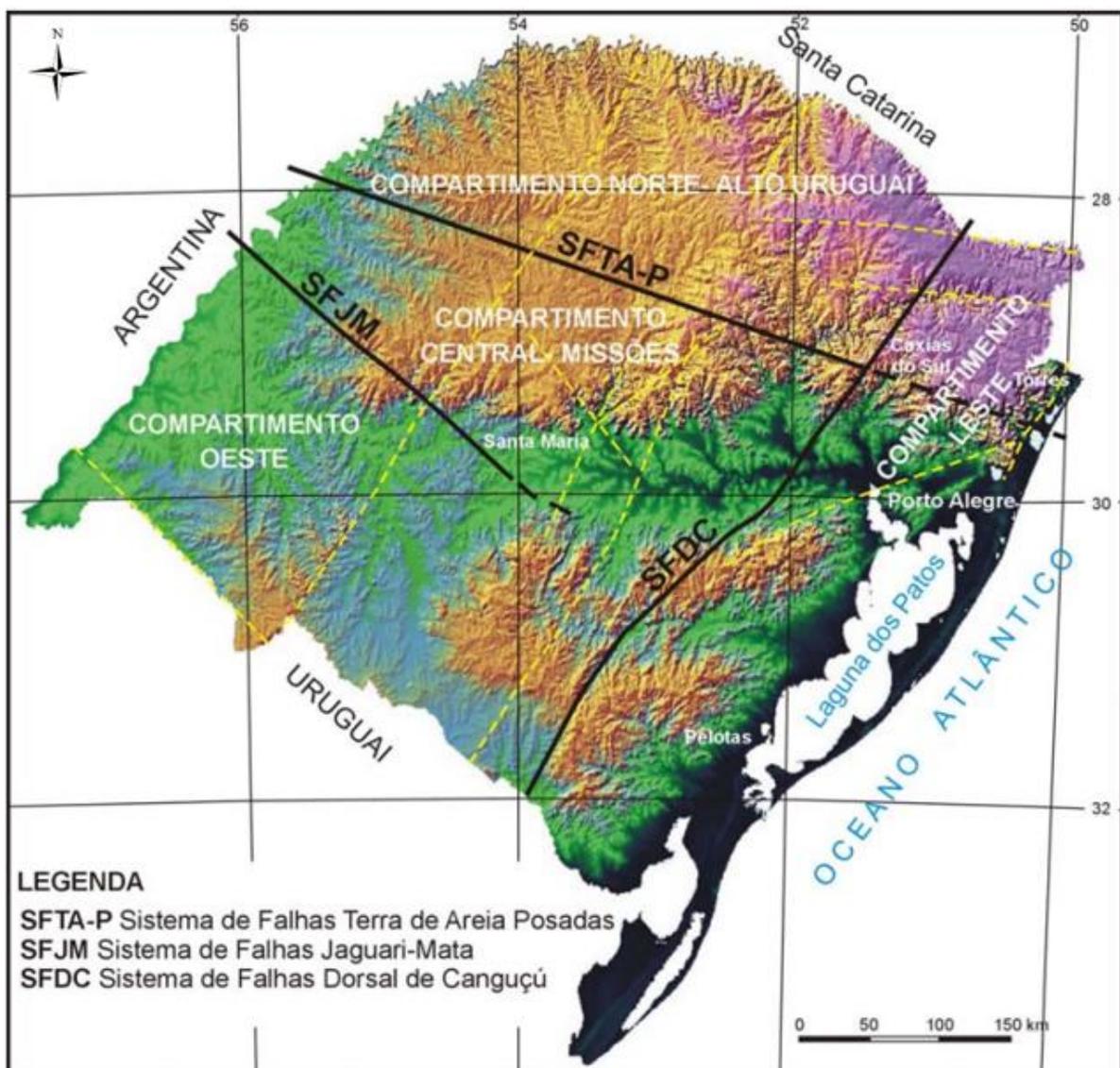
Em ambientes confinados, como é o caso do SAG em boa parte da região NERS, Soares (2008) sugere ainda que o fluxo da água é intrinsecamente dependente da geologia, principalmente a estrutural, com a água se movimentando no sentido do mergulho das camadas de rochas, podendo sofrer a atuação de rejeitos no impedimento da continuidade desse fluxo em casos onde as camadas de rochas permeáveis e impermeáveis se posicionem lado a lado.

Segundo Machado (2005a), a estruturação do SAG no Rio Grande do Sul está associada aos eventos tectônicos, e as sucessivas reativações das falhas. A partir da estruturação condicionada pelos três grandes Sistemas de Falhas SFTA-P, SFJM e SFDC, o autor sugere a compartimentação regional do SAG em quatro áreas com características estruturais e hidrogeológicas distintas, os compartimentos Leste, Oeste, Central-Missões e Norte-Alto Uruguai (Figura 22).

Área de Estudo está situada sobre os Sistemas de Falhas SFTA-P e SFDC, englobando áreas dos compartimentos Leste, Norte-Alto Uruguai e Central-Missões. O compartimento Leste, segundo Machado (2005a), apresenta dois condicionamentos estruturais, um na porção litorânea, onde as falhas de direção nordeste estão com rejeitos escalonados em direção ao oceano, segmentando o topo do SAG, que pode apresentar cotas do seu topo inferiores a -200 m.s.n.m. Já no segundo, no sentido de Taquara a São Sebastião do Caí, ocorrem menores

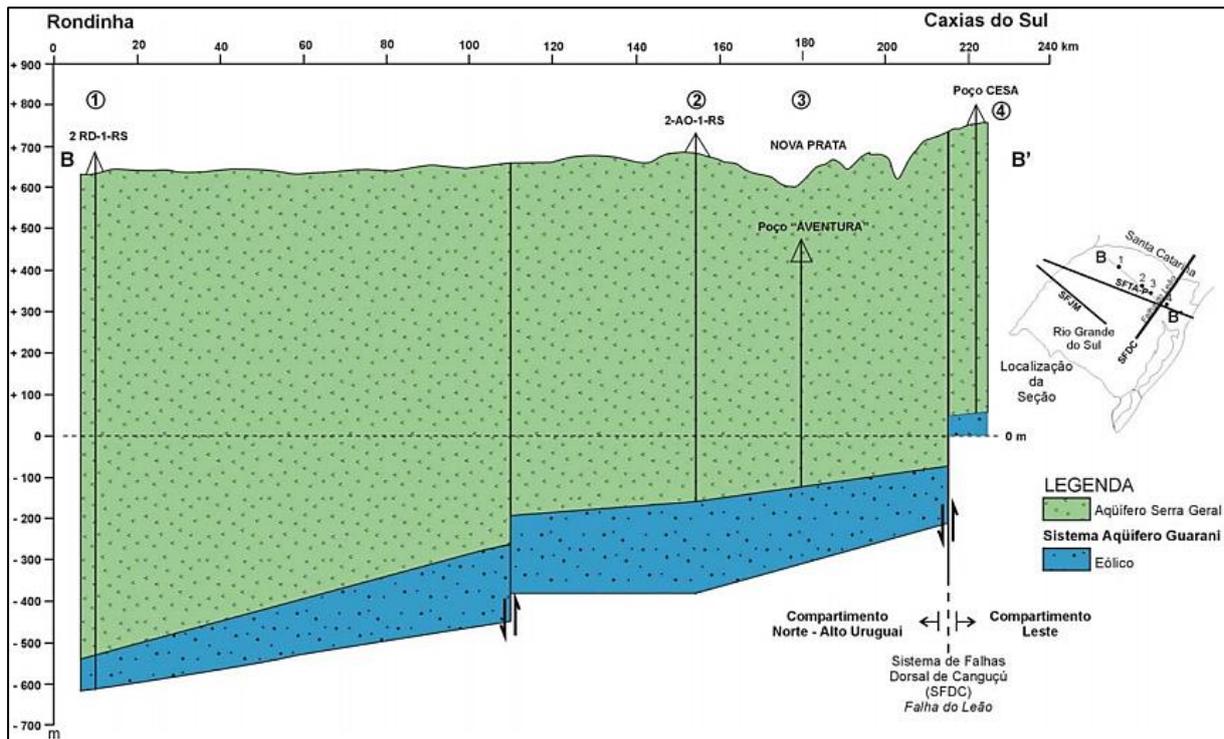
variações do topo, que só vai apresentar valores positivos maiores a partir de Caxias do Sul (Figura 23). Na porção leste do Compartimento Central-Missões, próximo SFDC, as estruturas tectônicas promovem o aparecimento de cotas negativas do topo do SAG nas proximidades das áreas de afloramento. O autor sugere ainda que a ocorrência de potencialidade nula de poços perfurado no Aquífero Botucatu pode estar relacionado com uma compartimentação específica nesses locais. Para o compartimento Norte-Alto Uruguai, segundo o autor, o topo do SAG assume valores próximos de -100 m.s.n.m. na porção leste, onde se encontra a SFDC, decrescendo no sentido oeste, apresentando valores positivos na área mais ao norte.

Figura 22 - Compartimentos estruturais do SAG no estado do RS.



Fonte: Machado (2005a).

Figura 23 - Seção geológica esquemática ilustrando o efeito do SFDC sobre o SAG.



Fonte: Machado (2005a).

Philipp et al. (2014), identificaram na região NERS que grandes sistemas de falhas regionais de direção NE e NW atuam na interrupção da continuidade das camadas de rochas sedimentares. A presença de grandes sistemas de falhas regionais, com origem no embasamento, que secciona todo o pacote de rocha, proporciona uma movimentação de blocos.

Na porção centro-sul da área de estudo, Betiollo (2006) delimitou 4 compartimentos tectono-estruturais, denominados Bloco Cambará, Bloco Caxias, Bloco São Vendelino e Bloco Lajeado, utilizando como base três alinhamentos regionais (Rolante, Caí e Turvo), com orientação NE variando de 0° à 40°, e perfis geológicos, complementados com informações bibliográficas e hidroquímicas.

3.7. Considerações sobre a revisão bibliográfica

As observações feitas por diferentes autores na Bacia do Paraná mostram que o SAG é um sistema aquífero que se encontra compartimentado. Apesar da utilização de metodologias distintas, estes estudos possuem em comum a identificação de uma atuação estrutural, na

forma de falhas ou sistemas de falhas, que influenciam diretamente nas características geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas do SAG. Estes estudos possuem como foco, em geral, as escalas regionais, para a delimitação de grandes blocos, ou em análises que se limitam a uma área muito pequena, deixando assim uma lacuna que pode ser suprida por este trabalho.

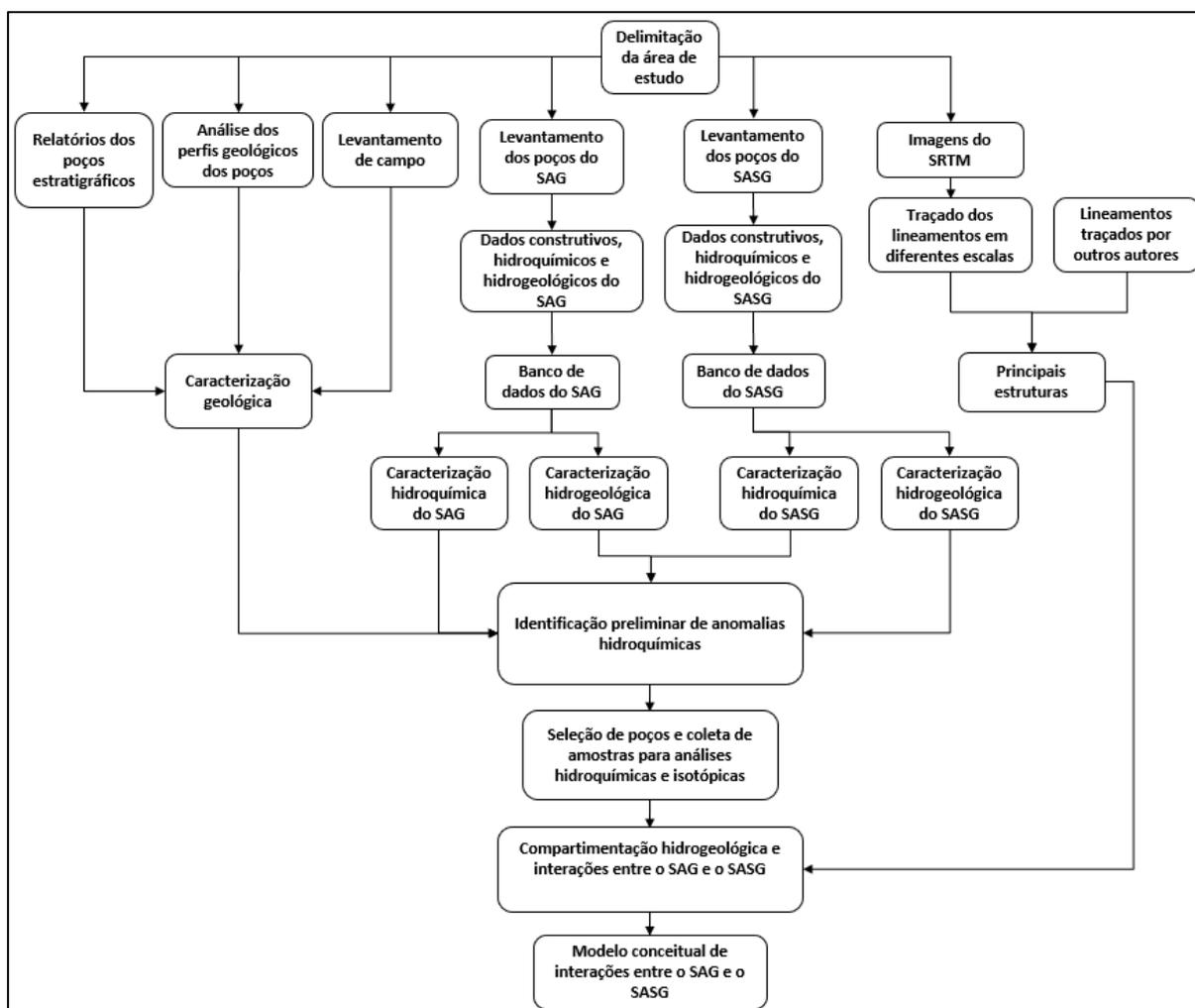
As estruturas que atuam na compartimentação podem, em alguns casos, possibilitar a recarga indireta, representada pela ascensão das águas do SAG para o SASG. A suposição da existência desse processo geralmente se limita a uma avaliação das características hidroquímicas, com presença de águas que diferem das bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas tipicamente encontradas no SASG, ou de elementos que dificilmente seriam explicados pela interação água-rocha nesse sistema aquífero. Porém, é necessário ter cuidado ao se considerar apenas um ou outro parâmetro para este tipo de análise, visto que a presença de valores anômalos nem sempre representam as características reais dessas águas, principalmente em poços com entradas de água mais superficiais, que podem, por exemplo, ter influência de fontes antrópicas.

Dessa forma, uma interpretação consistente quanto a existência de interações entre os dois sistemas aquíferos deve sempre ser balizada por uma avaliação completa dos parâmetros físico-químicos, bem como de uma comprovação de que seja hidráulicamente possível desse processo ocorrer.

4. MATERIAL E MÉTODOS

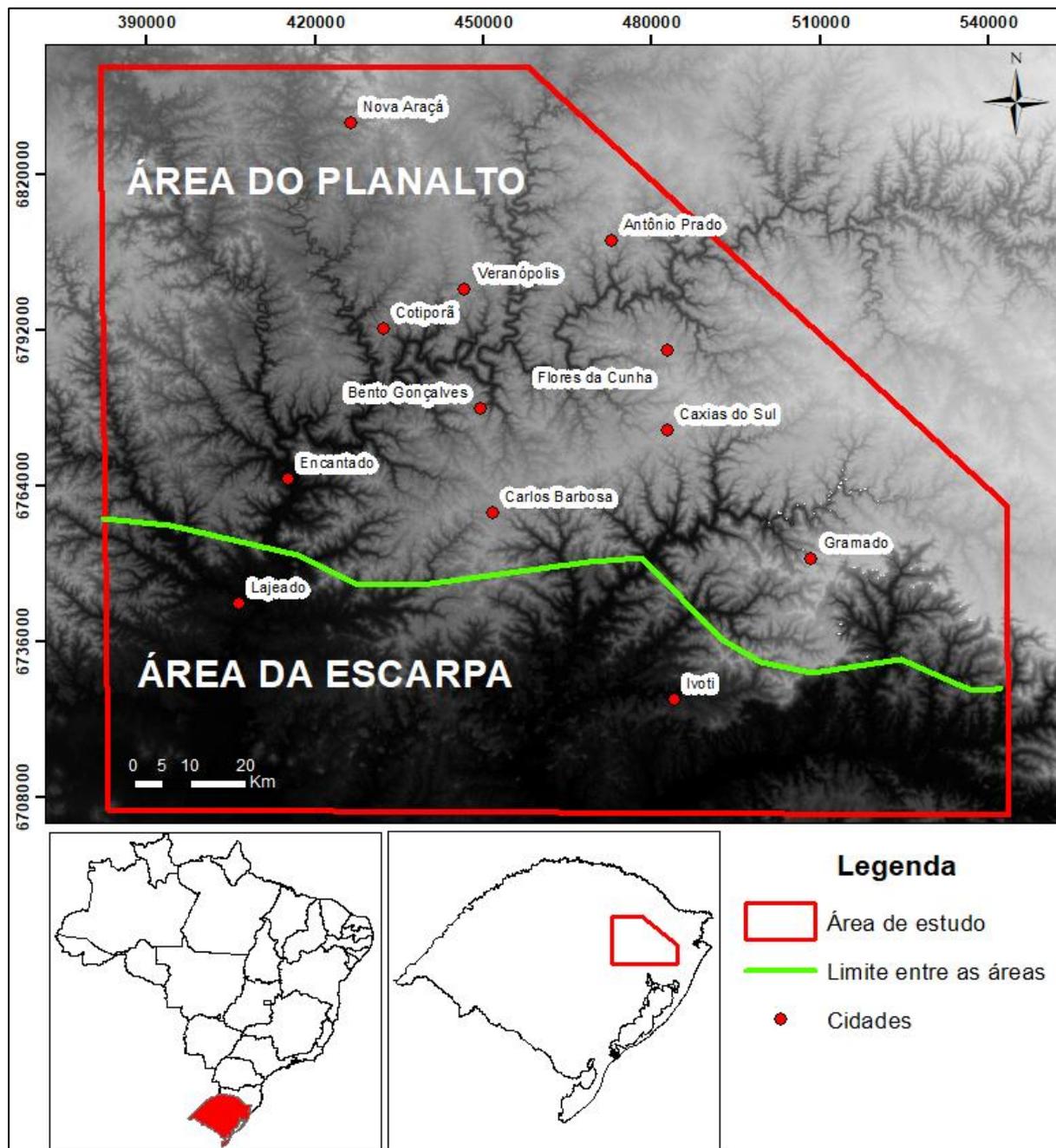
Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizada a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 24, que se inicia com a definição da área estudo, passando pelo levantamento das informações existentes, que serviram de base para avaliar a compartimentação e a interação hidrogeológica entre o SAG e o SASG.

Figura 24 - Fluxograma com a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa.



A área de estudo foi subdividida em duas partes (Figura 25), sendo a porção superior correspondente ao Domínio Geomorfológico Planalto dos Campos Gerais, e a parte inferior a Escarpa da Serra Geral, sendo denominados na continuidade do trabalho, respectivamente, como Área do Planalto e Área da Escarpa. Todas as análises apresentadas no fluxograma anterior foram realizadas para toda a área de estudo, com exceção daquelas que levam em consideração as informações do SASG, que foram utilizadas apenas na parte superior.

Figura 25 - Subdivisão da área de estudo em Área da Escarpa e Área do Planalto.



A opção pelo estudo independente das duas áreas se deu em função das características distintas entre elas. Na Área da Escarpa existe uma quantidade muito maior de poços do SAG, porém o grau de confinamento é geralmente baixo, com regiões onde inclusive não existe a cobertura de rochas vulcânicas sobre os arenitos, o que torna difícil uma avaliação quanto a interação entre os dois aquíferos. Já na Área do Planalto, apesar do número menor de poços, o grau de confinamento é, em geral, muito maior, proporcionando uma dinâmica totalmente diferente entre os aquíferos.

4.1. Inventário e cadastro dos poços tubulares

Com a área de estudo definida, foi feito um levantamento de informações em publicações de diversos níveis, como em notas técnicas, artigos científicos, trabalhos de conclusão de cursos, dissertações, teses e mapas temáticos (geológico, hidrogeológico, geomorfológico, topográfico). Essa etapa foi importante porque muitos dos trabalhos desenvolvidos na região utilizam como base as informações de poços que, em alguns casos, podem não estar disponíveis para consulta em banco de dados de plataformas oficiais.

Para o inventário e cadastramento dos poços tubulares foram feitas consultas a diferentes sistemas, empresas e instituições, como o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), a Companhia Riograndense de Abastecimento (CORSAN), as Prefeituras Municipais, os relatórios de poços estratigráficos da Agência Nacional de Petróleo (ANP), os relatórios de perfuração e de análises físico-químicas de empresas de perfuração, além de levantamentos em campo.

Os poços encontrados foram separados em duas categorias, uma com aqueles perfurados apenas nas rochas vulcânicas do SASG, e outra cujas perfurações também interceptavam as rochas sedimentares do SAG.

Primeiramente foram analisados apenas os poços referentes ao SAG, com estes passando por uma primeira filtragem, onde foi avaliado o grau de confiabilidade de algumas informações básicas, como localização e cota do terreno. Dessa forma, alguns poços foram desconsiderados por conta da impossibilidade de se determinar com precisão a sua real localização, o que poderia acarretar erros significativos ao estudo.

Como os poços foram perfurados ao longo de várias décadas, com equipamentos para a medição das cotas, em casos mais antigo, de baixa precisão, foram encontradas cotas do terreno que destoam da realidade. Para sanar esse problema, sem ter que descartar as informações dos poços, foram utilizadas duas metodologias: quando possível, a cota foi obtida em campo com a utilização de GPS, e nas demais situações foram utilizadas as cotas do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), de 30 m de resolução (USGS, 2016), de maneira similar à proposta por Demétrio et al. (2006) e Lobler et al. (2014).

Os poços selecionados após a filtragem foram inseridos no banco de dados, detalhando as suas principais características e parâmetros que foram utilizados nesse estudo, como profundidade de perfuração, cota da base do poço, espessura das rochas vulcânicas, cota do topo do SAG, espessura das rochas sedimentares interceptadas na perfuração, quantidade e

profundidade das entradas de água, características construtivas dos poços, datas de perfuração dos poços e da medição de parâmetros, identificação das litologias interceptadas, valores de parâmetros físico-químicos da água, dados dos ensaios de bombeamento, níveis estáticos e dinâmicos, medições de vazão e capacidade específica. Ao final, cada poço recebeu um código de referência, sendo estes denominados para sequência do trabalho como poços do SAG.

A segunda filtragem levou em conta a existência de possíveis erros nos dados hidroquímicos dos relatórios. Nesse caso foi avaliada a presença de inconsistências e valores anormais que poderiam influenciar nas análises. Foi verificado cada poço e parâmetro individualmente, de modo a determinar se o problema existente ocorreu por erros no preenchimento dos relatórios, ou por alguma situação na coleta e análise das amostras, o que inviabilizaria a utilização dessa amostra como um todo.

Posteriormente, essa mesma metodologia de filtragem dos dados e seleção dos poços também foi aplicada para aqueles que interceptavam apenas as rochas vulcânicas, sendo estes organizados em um outro banco de dados, e também recebendo um código de referência, sendo denominados como poços do SASG.

4.2. Caracterização estrutural

Para a caracterização estrutural da área foi utilizado o software Global Mapper para obter as imagens que foram utilizadas para traçar os lineamentos morfoestruturais. Essas imagens consistem em modelos digitais de elevação (MDE), do SRTM, com resolução de 30 m. A área selecionada para o recorte da imagem contemplou não apenas a área de estudo, como também uma extensão a mais ao seu redor, de modo a evitar efeitos de borda.

Com a utilização de ferramentas do software Global Mapper, essas imagens passaram por um tratamento com uma falsa iluminação nas direções 0°, 45°, 90° e 315°, buscando salientar o relevo, e facilitar a visualização e traçado dos lineamentos. Após esse procedimento, as imagens geradas foram exportadas em formato GEOTIF para o software ArcGIS, onde foi feita a interpretação e o traçado das morfoestruturas.

No software ArcGIS, o primeiro passo foi definir o sistema de referência utilizado no desenvolvimento desse estudo, o SIRGAS 2000. Depois foram criados shapefiles de retas, com informações cartesianas de início e fim, que foram utilizadas para traçar e representar os lineamentos morfoestruturais. Para o traçado dessas morfoestruturas foram definidas duas

escalas de trabalho, 1:1.000.000 e 1:250.000. A escolha dessas escalas se deve ao tamanho da área selecionada para o estudo e pela influência de grandes estruturas na compartimentação de blocos.

Após traçar os lineamentos nas diferentes escalas, foi utilizada a ferramenta AzimuthFinder, conforme a metodologia proposta por Queiroz et al. (2014), para a extração das informações referentes aos traçados, que serviram de base para a elaboração dos diagramas de rosetas, para determinar a quantidade, orientação e comprimento dos lineamentos.

Mapas de densidade de lineamentos foram elaborados para identificar a ocorrência de regiões com maior ou menor grau de densidade. Para a elaboração desses mapas foi utilizada a ferramenta Line Density do software ArcGIS, considerando um raio de busca (distância a partir de um ponto no grid, de onde são considerados os segmentos de retas existentes) de 3.500 m, com os resultados sendo expressos em densidade de lineamento por quilômetro quadrado. Os valores de densidade de lineamento foram detalhados nos mapas na forma de quartis, dando ênfase as densidades encontradas em um patamar superior ao terceiro quartil.

Para identificar os principais lineamentos foram levadas em consideração as informações obtidas para as duas escalas. A análise integrada entre esses dois conjuntos proporcionou a identificação dos lineamentos mais importantes na região, que foram considerados como aqueles que demonstraram uma representatividade nas diferentes escalas. Nesse processo também se levou em consideração os traçados avaliados por outros autores, como Machado (2005a), Giardin e Faccini (2010), Philipp et al. (2014), e Freitas (2016).

4.3. Caracterização geológica

A caracterização geológica foi realizada com base na interpretação de dados obtidos dos perfis geológicos de perfuração dos poços tubulares, dos relatórios de perfuração de poços estratigráficos para pesquisas de hidrocarbonetos e de levantamentos de campo.

Os dados dos poços da ANP foram utilizados para avaliar a ocorrência de diferentes Unidades Estratigráficas existentes em subsuperfície na área de estudo, bem como para estimar as espessuras dos pacotes de rochas vulcânicas e sedimentares, que constituem, respectivamente, o SASG e o SAG. Os dados dos perfis geológicos dos poços tubulares foram utilizados para avaliar a ocorrência, distribuição e espessura do pacote de rochas vulcânicas e sedimentares existente na região, que foram interceptados por esses poços.

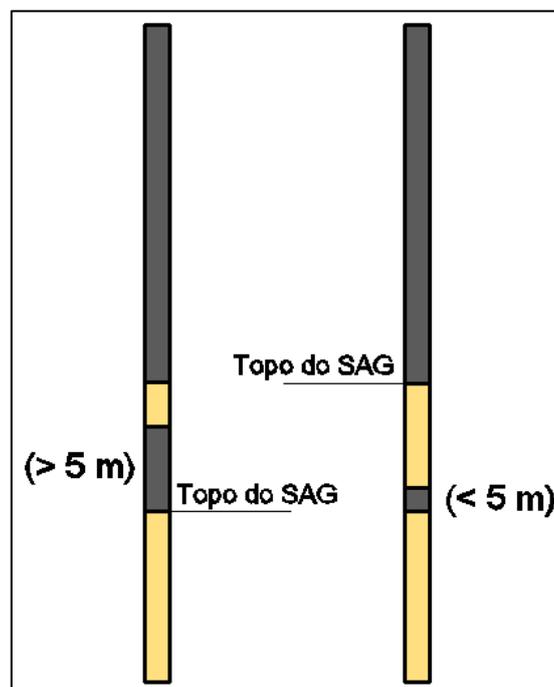
Com relação as rochas vulcânicas, avaliou-se as litologias e estruturas que estão descritas nos perfis geológicos, bem como a variação da sua espessura, que foram utilizadas para fazer uma descrição geral da área.

Já para as rochas sedimentares, foi feita uma avaliação das diferentes litologias que foram identificadas nos perfis geológicos, e uma caracterização com base na descrição dos dados presentes nesses perfis. Como na região a principal Unidade Hidroestratigráfica do SAG, interceptada pelos poços, é a Unidade Botucatu, foi dado ênfase para a descrição das suas características, como litologia, espessura e continuidade.

A cota do topo do SAG, referente ao contato entre as rochas sedimentares e vulcânicas, foi obtida levando em consideração as profundidades até este ponto, indicadas nos perfis geológicos, e a cota do terreno no local.

Nos casos em que existirem intertraps, para determinar onde de fato está posicionado o topo do SAG, foi utilizado como regra que: quando a espessura de rocha vulcânica, abaixo da camada de rocha sedimentar, for elevada, foi considerado como topo SAG o contato abaixo dela. Já nos casos onde essa espessura é pequena, menores que 5 m, o topo do SAG foi considerado como o contato superior da rocha sedimentar que se encontra acima dela (Figura 26). Optou-se por esta metodologia por conta da existência nessa área de intrusões magmáticas, na forma de diques e soleiras, o que poderia falsamente indicar a presença de um intertrap.

Figura 26 - Esquema para definição do posicionamento do topo do SAG.



Com base nas informações obtidas foram realizados levantamentos de campo em afloramentos na região, de modo a identificar o contato, ou a transição entre as rochas vulcânicas e sedimentares. Esses levantamentos foram feitos nas encostas dos morros e nos vales, ao longo de rodovias e pequenas estradas que cortam o relevo em diferentes altitudes, em locais onde exista uma maior possibilidade de encontrar essa transição. Nos afloramentos foi feita a medição das coordenadas e da altitude, bem como a descrição das rochas e das estruturas encontradas.

Essas informações levantadas em campo foram utilizadas de forma complementar aos dados obtidos a partir dos relatórios, contribuindo para uma melhor caracterização geológica da região.

Com essas informações, foram desenvolvidos mapas temáticos com o intuito de representar o comportamento do topo do SAG e das variações das espessuras das rochas vulcânicas na região.

4.4. Caracterização hidrogeológica

As metodologias utilizadas para a caracterização hidrogeológica do SAG e do SASG foram baseadas no levantamento de informações das etapas anteriores. Para tanto, foram utilizados os dados de posicionamento das entradas de água, nível estático, vazões e capacidade específica.

Com relação as entradas de água do aquífero fraturado, utilizou-se as informações que constam nos relatórios de perfuração para analisar a sua quantidade, bem como suas referidas cotas altimétricas. Já para os poços do SAG, além dessas informações, buscou-se descobrir se essas entradas de água existentes nas rochas vulcânicas estavam isoladas, ou permitiam alguma contribuição de água para o interior do poço.

Por conta da possibilidade de contribuição de água das fraturas existentes nas rochas vulcânicas no interior dos poços do SAG, optou-se pela elaboração de dois mapas potenciométricos para esse sistema aquífero, um contendo as informações potenciométricas de todos os poços, e outro levando em consideração apenas os poços onde essa contribuição não ocorre. A comparação entre os dois mapas serviu de base para compreender se uma possível contribuição proveniente das rochas vulcânicas no interior do poço, após a perfuração, proporciona alterações significativas na potencimetria regional, já que em caso negativo, seria possível utilizar um conjunto maior de poços para realizar as demais análises.

A potenciometria do SASG foi avaliada de forma pontual, sendo representativa apenas para o local onde se situa o poço, visto que esse parâmetro é influenciado por diversos fatores, o que inviabiliza a sua espacialização regional.

A vazão (Q) é um parâmetro que foi avaliado como valor absoluto, visto que é uma variável que depende de diferentes fatores como tipo de aquífero, propriedades hidrodinâmicas e de armazenamento do aquífero, características construtivas dos poços, sistema de bombeamento utilizado no teste e o que está instalado no poço. Apesar de não representar de fato a capacidade que o aquífero possui, essa informação é importante para se estimar os volumes que são explorados na região. A análise das vazões dos poços do SAG e do SASG, obtidas a partir de ensaios de bombeamento, permitirá compreender melhor de que forma é explorado cada um dos sistemas aquíferos na região.

Para avaliar a capacidade de produção dos poços do SAG e do SASG utilizou-se como parâmetro a capacidade específica (q_s). Para determinar esse parâmetro foram utilizadas as vazões encontradas nos ensaios de bombeamento, e o rebaixamento relativo a elas, tomando como base os níveis estáticos e dinâmicos. Por conta dos diferentes intervalos de duração encontrados para este ensaio (6h, 12h, 24h, 30h, etc.), optou-se pela uniformização com um período de referência de 24h, visto que esse foi o intervalo padrão encontrado na grande maioria dos relatórios. Assim, para esta análise, foram considerados apenas os poços cujos ensaios possuíssem esse intervalo. Em alguns relatórios mais detalhados, onde os ensaios possuem durações superiores a 24h, foi possível calcular o valor referente ao intervalo desejado utilizando como base as variações dos níveis.

4.5. Caracterização hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral

A caracterização hidroquímica das águas da região, foi realizada em duas etapas. Primeiramente foi feita uma avaliação preliminar, utilizando as informações constantes nos bancos de dados dos poços do SAG e do SASG. Posteriormente, utilizou-se para a sua complementação os dados obtidos a partir das coletas de amostra em campo, que foram utilizados na avaliação da interação entre os sistemas aquíferos.

Como metodologia para a escolha das informações, optou-se que para os casos onde existem mais de um relatório de análises físico-químicas, para a seleção daquele a ser utilizado, foi dada prioridade para os que possuíam informações mais completas, e depois para os mais recentes.

Para avaliar as características hidroquímicas foram utilizadas as seguintes informações: condutividade elétrica (CE), pH, sólidos dissolvidos totais (SDT), temperatura, carbonato, bicarbonato, cloreto, fluoreto, sulfato, cálcio, magnésio, potássio e sódio.

Previamente, antes da utilização das informações hidroquímicas nas análises, foi feita uma avaliação quanto ao erro prático do balanço iônico (E_p), referente aos parâmetros físico-químicos constantes nos relatórios de cada poço. Para tanto, foi considerado como um erro aceitável valores de até 15%, positivos ou negativos, segundo o critério proposto por Logan (1965), representado na Equação 3.

$$E_p(\%) = \left| \frac{r \sum \hat{anions} - r \sum \hat{cations}}{r \sum \hat{anions} + r \sum \hat{cations}} \right| \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Com os parâmetros físico-químicos obtidos, e com a utilização do software Qualigraf 1.17 (MOBUS, 2016), foi feita uma avaliação das características das águas do SAG e do SASG, com a elaboração do diagrama de Piper, que foi utilizado para classificar os grupos de águas com base nos seus íons dominantes.

Outra metodologia empregada foi a análise binária para avaliar a existência de tendências e correlações entre as características das águas. Foram feitas análises entre os parâmetros físico-químicos presentes nas amostras, bem como destes com a espessura das rochas vulcânicas que recobrem o SAG, e com a variação do topo do SAG.

Para avaliar as similaridade e dissimilaridades entre as águas, foram empregadas duas metodologias distintas, e de modo independente, o método Agrupamento Cluster Hierárquico, e a Análise das Componentes Principais (ACP), com a utilização do software IBM SPSS Statistics versão 24. Para a aplicação dessas duas metodologias, foram utilizados os seguintes parâmetros: cálcio, magnésio, sódio, condutividade elétrica, bicarbonato, cloreto, fluoreto e sulfato. Não foram utilizados nessas análises os dados de potássio e de pH, por conta da inexistência ou falta de confiabilidade dessas informações em alguns poços. De modo a evitar o efeito de escala por conta da utilização de diferentes tipos de variáveis, em ambos os procedimentos foi utilizada a padronização dos dados a partir de um escore padrão, denominado Z escore.

O método Agrupamento Cluster Hierárquico é uma técnica de análise multivariada que tem como premissa o agrupamento de indivíduos baseado nas similaridades entre as informações que o caracterizam. No caso das informações hidroquímica dos poços, este método avalia cada um dos parâmetros, e agrupa os poços em função da semelhança entre

suas características. Para tanto foi utilizada a classificação do tipo cluster hierárquico, com um agrupamento pelo método de Ward, produzindo como resultado os dendrogramas explicativos para os diferentes grupos de águas.

A análise das componentes principais é uma técnica que transforma um conjunto de dados correlacionados, em novas variáveis não correlacionadas, e que são funções lineares do conjunto original, sendo estas denominadas de Componentes Principais. Para este estudo optou-se pela utilização apenas de componentes que apresentaram autovalores superiores a 1, independente da variância total explicada. A partir da aplicação desse método, foi gerado uma matriz dos componentes, que mostram a relação de cada componente principal com as variáveis originais, bem como os escores referentes a cada amostra de água analisada, que permitiu avaliar suas relações com as novas componentes.

Todas as metodologias indicadas para a avaliação da hidroquímica foi aplicada de forma independente para cada sistema aquífero, de modo a evitar que os valores dos parâmetros, com características diferentes, influenciassem nos resultados. Posteriormente, com base nessa premissa de não interferência, foi possível avaliar as similaridades existentes entre as águas dos dois sistemas aquíferos.

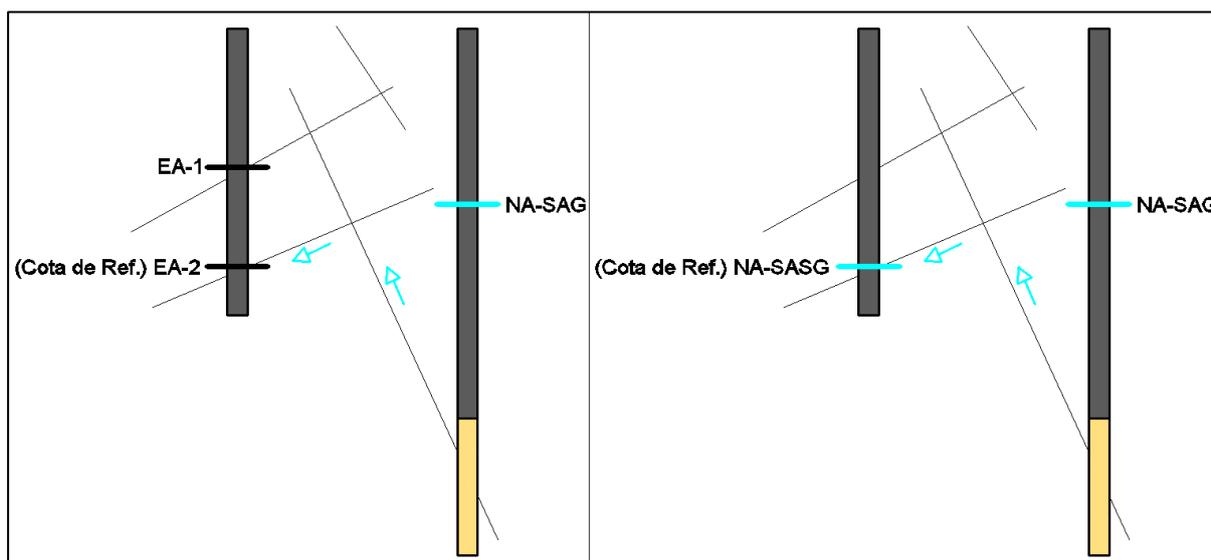
4.6. Identificação de interações entre o SAG e o SASG

A metodologia proposta para identificar as interações entre o SAG e o SASG utilizou como base, primeiramente, os dados presentes nos relatórios de todos os poços localizados na Área do Planalto, de modo a identificar os locais onde existe a possibilidade de interações, considerando a hidroquímica, potenciometria e a presença de estruturas de conexão. Posteriormente, com base nessas informações foram selecionados poços do SAG e do SASG, onde foram feitas coletas de amostras de água para realizar as análises físico-químicas e isotópicas, de modo a caracterizar e confirmar a existência de interações.

O procedimento utilizado para definir a ocorrência de interações entre os aquíferos partiu de duas premissas, a existência de características hidroquímicas nas águas do SASG similares às encontradas para o SAG na região, e a existência de uma potenciometria favorável. Para este estudo, definiu-se como potenciometria favorável quando a cota potenciométrica regional do SAG, em um determinado ponto, se situa acima da cota de referência do SASG (Figura 27). Por conta da falta de informações em alguns poços, de modo a evitar limitações, foi utilizado primeiramente como cota de referência a cota da entrada de

água mais profunda, e quando essa informação não estava disponível, a cota potenciométrica do SASG naquele ponto. Com relação a potencimetria, partiu-se do princípio de que ela dificilmente estaria abaixo da entrada de água, e dessa forma se o nível do SAG estiver acima dela, também estaria acima da fratura produtora.

Figura 27 - Esquema utilizado na definição da potencimetria favorável do SAG.



Além disso, para que ocorra a interação é necessária a existência de estruturas que conectem os aquíferos. Nesse caso, foram consideradas as grandes estruturas, capazes de seccionar os pacotes de rochas vulcânicas e sedimentares, e sua expressão em superfície identificada na forma de lineamentos morfoestruturais.

Com a utilização das informações hidroquímicas do SASG foram analisadas possíveis anomalias, que destoem das características típicas desse aquífero, e que se assemelhem as das águas do SAG, verificadas nesse estudo para esta região. Foram levadas em consideração a presença de concentrações mais elevadas de sulfato, cloreto, fluoreto, sódio, além maiores condutividades elétricas.

Com base nessas informações, nos locais onde verificou-se indicativos de interações entre as águas dos aquíferos, foram selecionados poços para a realização de coletas de água para a análise dos seus parâmetros físico-químicos e isotópicos.

Essa seleção contemplou os poços do SAG, e do SASG que apresentaram o indicativo de interação, bem como os poços do SASG próximos a eles, que funcionaram como controle, já que estes possuem características hidroquímicas típicas desse sistema aquífero, totalizando dessa forma 30 poços, sendo 10 do SAG, e 20 do SASG. Buscou-se selecionar os poços de

forma mais representativa possível para a região, levando em conta certas limitações, como disponibilidade de poços e a autorização do proprietário.

A coleta de amostras de água foi realizada levando em consideração as recomendações de Santos (2000) e CETESB (2011). O processo consistiu em, utilizando o sistema de bombeamento do próprio poço, manter primeiramente a bomba funcionando por um tempo que variou entre 10 minutos e algumas horas, para realizar a purga da água que possa estar estagnada no poço, de modo a obter uma amostra representativa da água do aquífero. Após esse período, foi realizada a coleta das amostras na saída da tubulação (Figura 28).

Figura 28 - Ponto de coleta de amostra de água.



As amostras coletadas foram acondicionadas em recipientes adequados, e rotuladas, sendo mantidas refrigeradas, e transportadas ao laboratório de análises físico-químicas e bacteriológicas do Centro de Ecologia da UFRGS (Figura 29), onde foram analisados os parâmetros cálcio, magnésio, potássio, sódio, fluoreto, alcalinidade, cloreto, sulfato, tendo como referência o Standard Methods 21ST, bem como as normas NBR 12621/1992, 13736/1996 e 13797/1997, com os limites de detecção sendo detalhados na Tabela 1. Já para analisar o pH, a condutividade elétrica, o SDT e a temperatura, foi utilizada uma sonda multiparâmetros Eutech - modelo PCStestr 35, com a medição sendo realizada em campo no momento da coleta da amostra (Figura 30).

Figura 29 - Recipientes utilizados no armazenamento das amostras hidroquímicas.



Tabela 1 - Limites de detecção para os parâmetros hidroquímicos.

Limites de detecção	
Cálcio	0,003
Magnésio	0,007
Potássio	0,110
Sódio	0,052
Cloreto	1,00
Fluoreto	0,10
Alcalinidade	1,00
Sulfato	1,00

Figura 30 - Sonda utilizada na medição dos parâmetros em campo.



Para a coleta de água destinada as análises isotópicas, foram utilizados recipientes de plástico, sem a adição de preservantes (Figura 31). Os frascos foram tampados, sendo verificado antes que não existiam bolhas de ar no seu interior, para evitar o fracionamento da amostra. As amostras foram armazenadas em um isopor, mantidas em temperatura ambiente, e enviadas ao Laboratório de Geologia Isotópica do Instituto de Geociências da UFRGS, para a avaliação dos isótopos estáveis oxigênio e deutério, utilizando como técnica de análise a espectrometria de massa (espectrômetro de massa Delta V Advantage acoplado com gas bench), com incerteza para $\delta^{18}\text{O}$ de 0,1 ‰, e para $\delta^2\text{H}$ de 0,4 ‰.

Figura 31 - Recipientes utilizados no armazenamento das amostras isotópicas.



As razões isotópicas de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e deutério ($\delta^2\text{H}$) das amostras coletadas foram comparadas aos valores de referência do VSMOW, e relacionadas com as retas meteóricas mundial e de Porto Alegre.

Com as análises isotópicas foi possível conhecer as razões isotópicas para as águas do SAG e do SASG na região, bem como compreender os mecanismos envolvidas na origem dessas águas.

Essas informações levantadas pelas análises físico-químicas e isotópicas foram utilizadas como base para definir a existência de interações entre os sistemas aquíferos, a partir da verificação dos padrões e das anomalias encontradas nas águas do SAG e do SASG, bem como no conjunto de poços de controle, sendo a hidroquímica utilizada como fator preponderante, complementada pela isotopia.

4.7. Compartimentação estrutural

Para avaliar as estruturas que atuam na compartimentação na área de estudo, foram utilizados como base as características morfoestruturais (traçado dos lineamentos), geológicas (variação na cota do topo do SAG e da espessura das rochas vulcânicas) e hidrogeológicas (potenciometria) do SAG.

Os lineamentos traçados em diferentes escalas foram o ponto de partida para a delimitação dos compartimentos. Os principais lineamentos da região, em conjunto com os traçados de outros autores, foram associados com as informações geológicas e hidrogeológicas, de modo a definir quais dessas atuam na compartimentação do aquífero. Foi feita uma avaliação regional, baseada nas variações do topo e da potenciometria do SAG, e posteriormente, um estudo poço a poço, considerando as estruturas existente entre eles, com a definição da atuação dessas estruturas sendo feita a partir da análise conjunta dessas duas informações.

As características geológicas levantadas em etapas anteriores foram utilizadas para compreender a atuação das estruturas tectônicas na movimentação dos pacotes de rochas, e em como esse processo influencia na individualização de blocos.

Relacionando o traçado dos lineamentos com a potenciometria da região foi possível identificar quais estruturas atuam sobre fluxo de água subterrânea do SAG, utilizando como base a existência de variação brusca do nível potenciométrico associado aos lineamentos.

Esses procedimentos foram aplicados para todas as morfoestruturas selecionadas anteriormente, e com isso, foi possível identificar todas aquelas que de fato compartimentam o aquífero.

Com base nessas avaliações foi possível determinar o arcabouço estrutural do SAG na região, com a delimitação das estruturas que atuam diretamente sobre o aquífero, influenciando na variabilidade das suas características.

4.8. Elaboração do modelo conceitual de circulação de água entre o SAG e o SASG

As informações e análises obtidas nas etapas anteriores serviram de base para a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual, visando demonstrar o efeito da compartimentação na circulação e interações entre as águas do SAG e do SASG.

Esse modelo é composto por um conjunto de seções conceituais que representem cada um dos locais onde foi verificada a interação entre as águas dos sistemas aquíferos. Nessas seções foram apresentadas as principais características das rochas vulcânicas e sedimentares, estruturas mapeadas, posicionamento da potenciometria do SAG, relevo da região, posicionamento dos cursos d'água, e processos envolvidos na interação entre as águas.

Com as informações sobre as rochas foi possível identificar a variação da sua espessura, bem como o contato entre elas. Já com as estruturas mapeadas e a potenciometria foram apresentados os caminhos por onde circulam as águas, e de que forma esses fluxos ocorrem. Além disso, as características geomorfológicas e hidroquímicas contribuíram para explicar os processos envolvidos na variabilidade dos níveis de misturas entre as águas.

4.9. Análises estatísticas e ferramentas gráficas

Todos os mapas temáticos que foram desenvolvidos nessa pesquisa tiveram como base a utilização da ferramenta de interpolação topo to raster do software ArcGIS. A escolha desse interpolador se deve ao fato dele apresentar uma boa adaptação aos dados para a região, com uma superfície mais suavizada e com poucas distorções. Já as análises binárias entre variáveis de interesse foram elaboradas com o auxílio do software Excel, indicando gráfica e numericamente, as relações entre elas.

Em casos específicos, quando foi necessário o traçado de isolinhas, para proporcionar um maior destaque para alguma informação, estas foram feitas utilizando a ferramenta contour do software ArcGIS.

As representações gráficas dos valores, na forma de mapas temáticos, baseadas nas análises estatísticas que foram desenvolvidas nesse estudo, tiveram como princípio a proposição metodológica aplicada por Athayde (2013) e Freitas (2016), que leva em consideração a escala em percentis, de modo a destacar valores anômalos, acima de um determinado patamar, que para este estudo foi considerado como o conjunto de dados acima do terceiro quartil. Também foram utilizadas escalas de cores, bem como identificadores de diferentes formatos, de modo a agregar mais informações às representações.

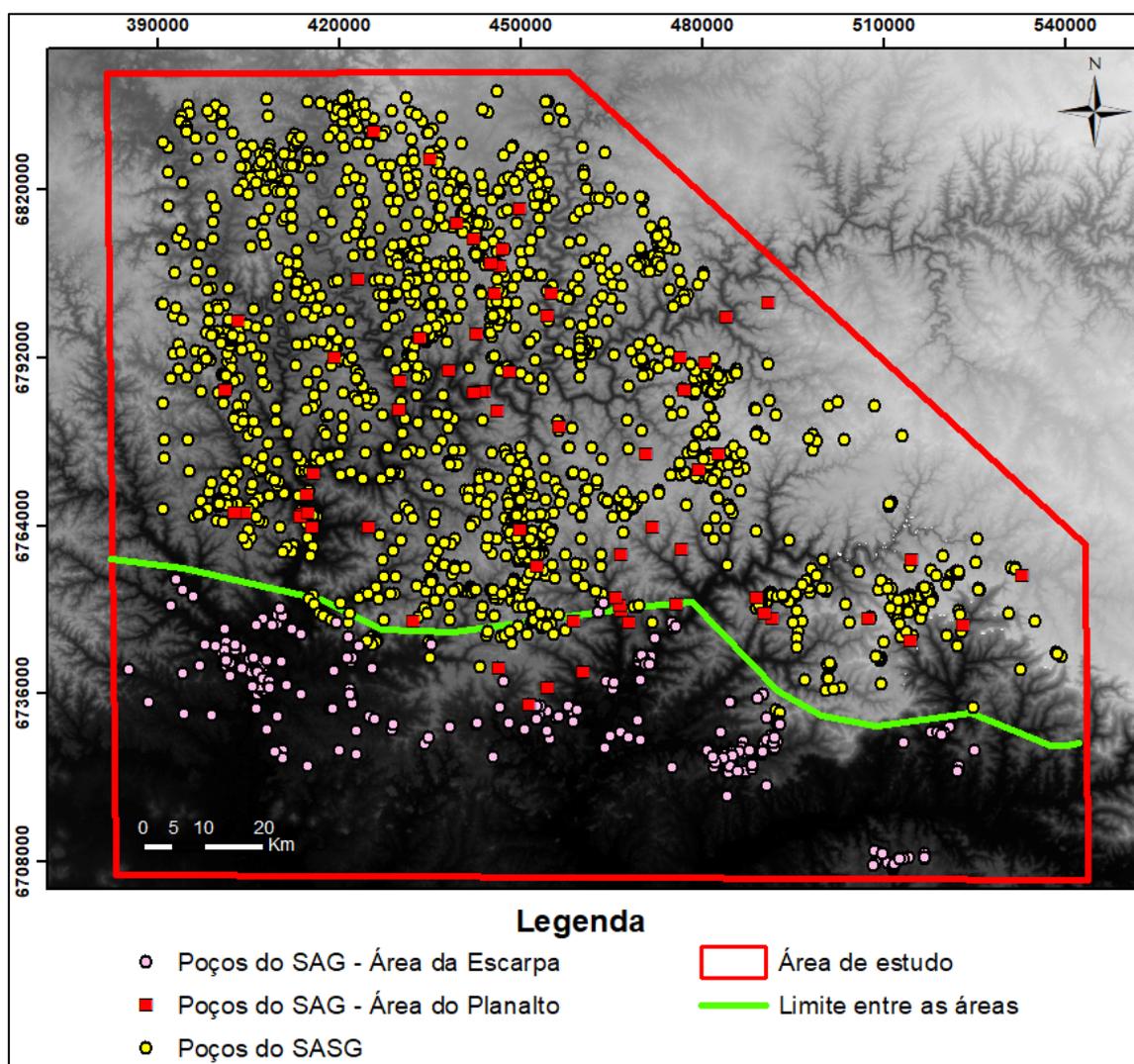
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Levantamento dos dados gerais

5.1.1. Inventário e avaliação das informações dos poços tubulares

Foram levantados 604 poços do SAG para toda a região NERS, dos quais 337 foram mantidos e inseridos no banco de dados, enquanto 267 foram retirados. Foram vários motivos que levaram a retirada dos poços, entre eles pode-se citar a existência de poços repetidos (duplicados ou triplicados), a falta de coordenadas de localização, falta de perfil geológico, coordenadas de localização incorretas e verificação em campo da inexistência do poço. Já com relação ao SASG, foram identificados 1.793 poços localizados dentro da área de influência dos poços do SAG (Figura 32).

Figura 32 - Localização dos poços utilizados no estudo.



Desse total de poços do SAG, 276 poços foram utilizados no estudo da Área da Escarpa e 68 para a Área do Planalto. Vale ressaltar que sete desses poços foram utilizados no estudo de ambas as regiões, em função de estarem posicionados em uma área de transição entre elas.

5.1.2. Análise dos perfis geológicos dos poços tubulares

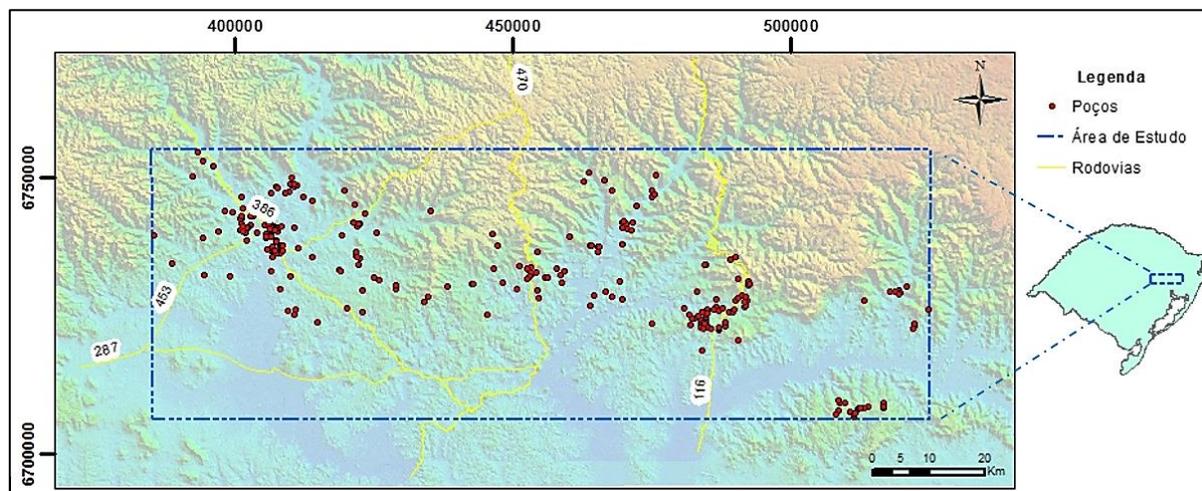
Os perfis geológicos foram utilizados na identificação dos diferentes pacotes de rochas vulcânicas e sedimentares existentes na área. Com relação as rochas vulcânicas, foi feita a verificação do pacote, demonstrando a sua existência recobrando as rochas sedimentares e a análise das suas espessuras.

Foi identificado que em 325 poços, ou seja, 96,4% do total, além das rochas vulcânicas, apenas os arenitos da Formação Botucatu foram interceptados na perfuração. Nos outros 12 casos, além do Botucatu, outras Formações também foram identificadas, como o Sanga do Cabral, Pirambóia e Rio do Rasto. Em alguns casos as litologias constavam nos relatórios como pertencentes ao Grupo Rosário do Sul (Formações Caturrita, Santa Maria e Sanga do Cabral), mas por suas características litológicas, foram consideradas como sendo relacionadas à Formação Sanga do Cabral.

5.2. Estudo da compartimentação do SAG na Área da Escarpa

A Área da Escarpa está localizada entre as coordenadas UTM sul 6754819 e 6706744, e UTM leste 385298 e 524874, compreendendo na sua área de abrangência 276 poços tubulares do SAG (Figura 33).

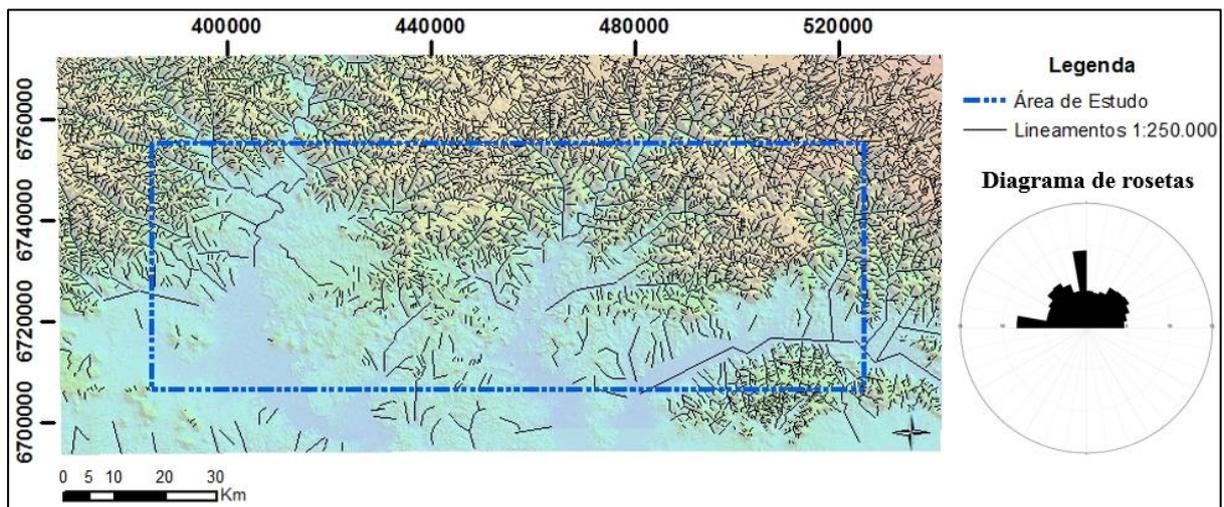
Figura 33 - Localização dos poços da Área da Escarpa.



5.2.1. Arcabouço morfoestrutural

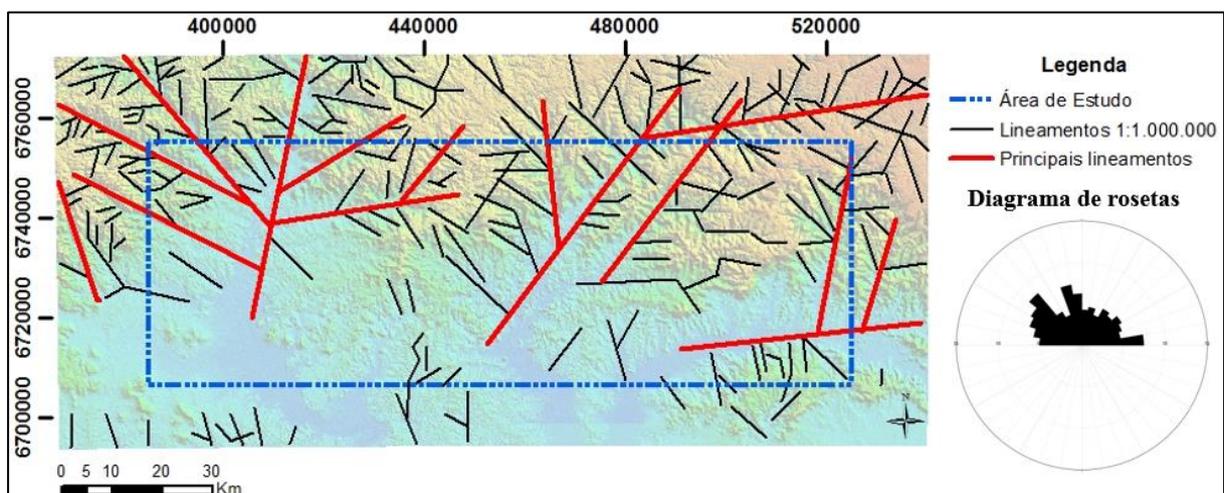
Para esta região, foram identificados 7.935 lineamentos para a escala 1:250.000 (Figura 34), tendo como direções mais frequentes as N-S e E-W, e secundariamente para os quadrantes Noroeste e Nordeste, sendo as principais orientações N00-10W, N80-90W, N30-50W e N40-60E.

Figura 34 - Mapa de lineamentos identificados na escala 1:250.000.



Na escala 1:1.000.000, foram identificados 257 lineamentos, com direções mais frequentes as N-S, E-W e NW, e secundariamente as NE. Para esta escala, as orientações N10-20W, N40-50W e N80-90E, se mostraram como as principais. Vale destacar a presença de 15 lineamentos morfoestruturais de médio porte, com comprimentos superiores a 20 km, observados nessa escala, com direções principais NE e NW, além de N-S e E-W (Figura 35).

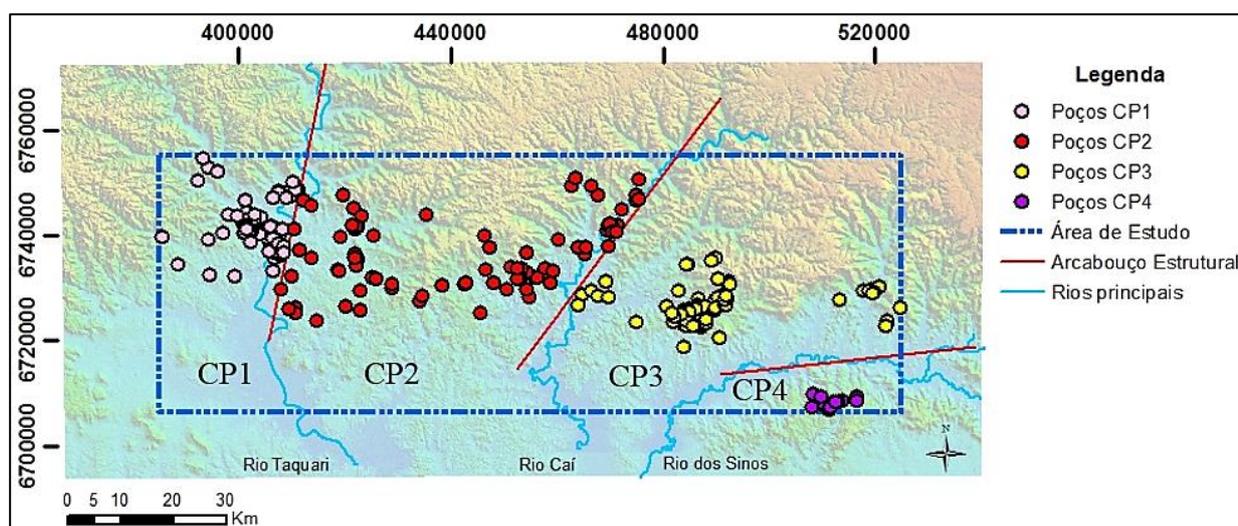
Figura 35 - Mapa de lineamentos identificados na escala 1:1.000.000.



Um dos pressupostos da análise da compartimentação era a de que existissem conjuntos de poços que fossem separados por essas estruturas, com informações hidrogeológicas suficientes para avaliar a sua atuação.

Com base nessa avaliação foram destacadas três estruturas com mais de 50 km de comprimento, encaixados em vales, por onde passam grandes rios da região (Rio dos Sinos, o Rio Caí e o Rio Taquari), e que foram utilizadas na avaliação da compartimentação. Os compartimentos formados pelo limite desses lineamentos foram denominados de CP1, CP2, CP3 e CP4 (Figura 36).

Figura 36 - Arcabouço morfoestrutural e delimitação dos compartimentos.



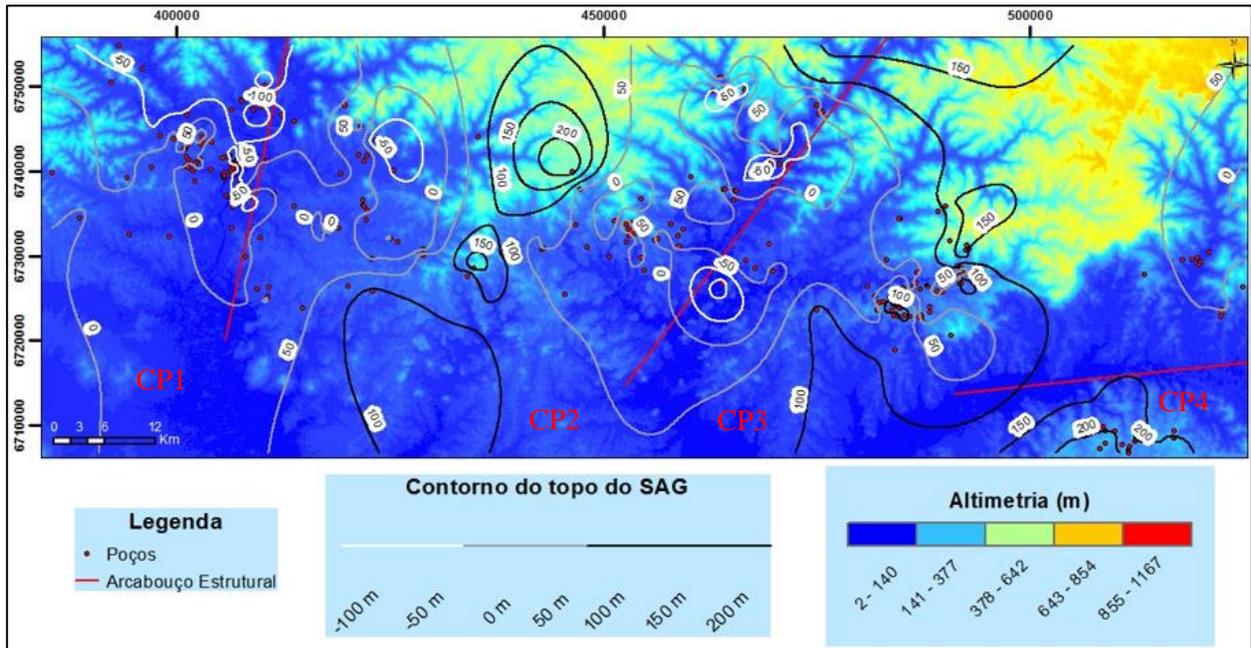
5.2.2. Variação da cota do topo do SAG e da espessura das rochas vulcânicas

A cota do topo do SAG demonstra a existência de uma grande heterogeneidade, tanto na avaliação da região como um todo, quanto em cada compartimento (Figura 37). A Tabela 2 apresenta um resumo dessas características.

Tabela 2 - Estatística da cota do topo do SAG, em m.s.n.m.

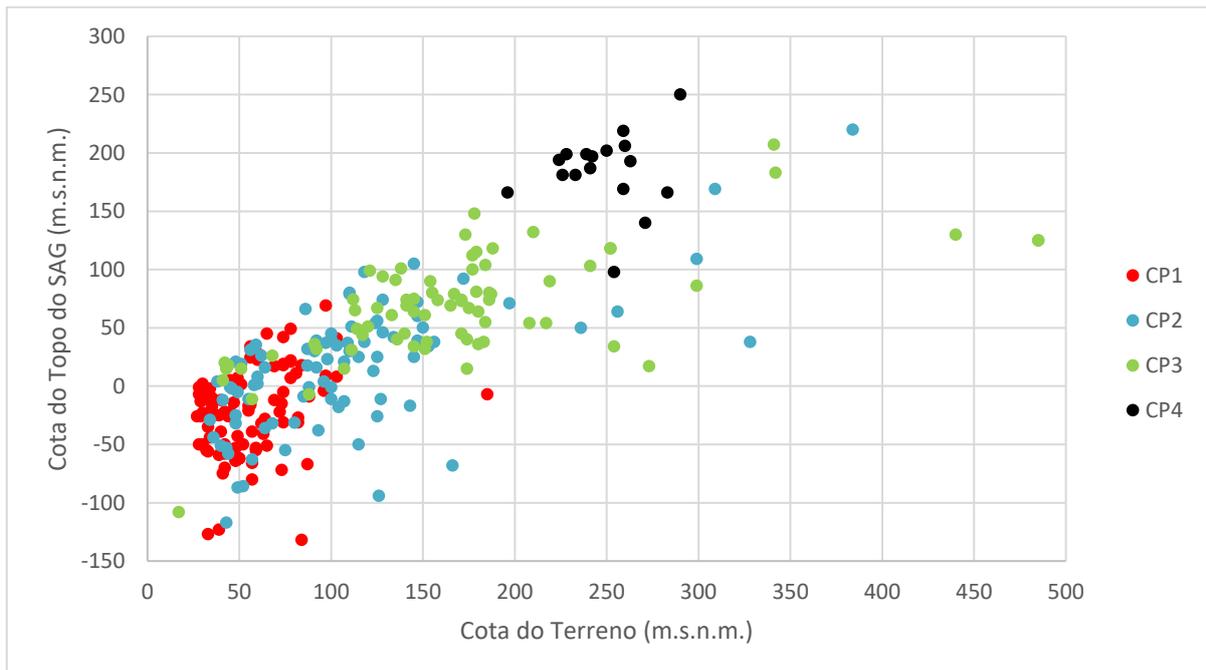
	CP1	CP2	CP3	CP4
Cota do Topo do SAG	-	-	-	-
Máxima	69	220	207	250
Mediana	-22	21	68	193
Média	-23,33	16,50	67,15	185,12
Mínima	-132	-117	-108	98

Figura 37 - Cota do topo do SAG na Área da Escarpa, em m.s.n.m.



Essas informações demonstram uma distinção entre os compartimentos, além de uma grande amplitude entre as cotas máximas e mínimas, com as médias e medianas apresentando valores muito próximos. Ao relacionar a cota do topo do SAG com a altimetria da região (Figura 38), verifica-se que existe uma tendência do topo do SAG de acompanhar o relevo, o que pode explicar essa grande variação encontrada dentro dos compartimentos.

Figura 38 - Relação entre a cota do topo do SAG e o relevo da região.



Algumas discrepâncias encontradas nessa tendência se localizam principalmente nos vales, onde foram identificados casos com variações de até 50 m na cota do topo do SAG entre poços, em uma pequena distância, próxima de 500 m. Como não foi observado nenhum indicativo de possível estrutura entre esses poços, uma possibilidade é que essa variação seja decorrente das variações do paleorelevo da Formação Botucatu, visto que, segundo Scherer (2000), as paleodunas podiam chegar a até 100 m.

Verificou-se também que, com exceção de três poços localizados no compartimento CP3, nos demais poços o topo do SAG se encontra em cotas positivas. A mesma tendência de cotas positivas também ocorre em CP4, só que em maior grau, com valores superiores a 90 m.s.n.m. Já em CP1 e CP2 as cotas apresentam uma grande variação, desde valores bem baixos, até alguns dos mais elevados da região, com a diferença de que em CP1, 75% das cotas encontradas são negativas, enquanto que em CP2, a grande maioria das cotas são positivas. Isso demonstra a existência de uma variabilidade dessa característica para os diferentes compartimentos.

Da mesma forma que o topo do SAG, as espessuras dos pacotes de rochas vulcânicas que recobrem o SAG na região também apresentam uma grande variação (Tabela 3). As espessuras médias se encontram, em geral, abaixo dos 100 m, o que segundo Hindi (2007), proporciona um baixo grau de confinamento ao SAG. Vale destacar que dos 276 poços, apenas 10 apresentaram espessuras superiores a 200 m, sendo 6 em CP3, 3 em CP2, e 1 em CP1.

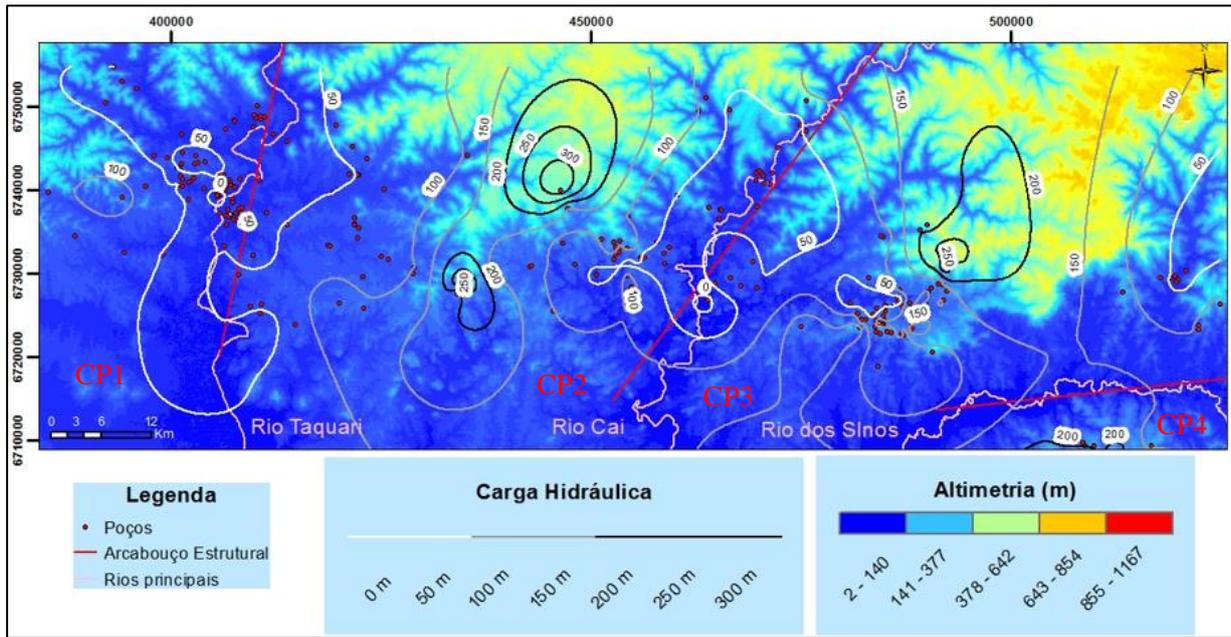
Tabela 3 - Estatística da espessura das rochas vulcânicas.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Espessura das rochas vulcânicas (m)	-	-	-	-
Máxima	216	290	360	156
Média	79,99	91,93	102,21	63,00
Mediana	78,00	80,00	89,00	48,00
Mínima	20	20	22	29

5.2.3. Relação do fluxo de água subterrânea com a compartimentação

A partir da carga hidráulica, foi possível definir a superfície potenciométrica para a região (Figura 39). Foram encontrados alguns altos potenciométricos, com destaque para o que se localiza na porção central da área, com níveis de mais de 300 m.s.n.m., além de outro à nordeste, com níveis superiores a 250 m.s.n.m.

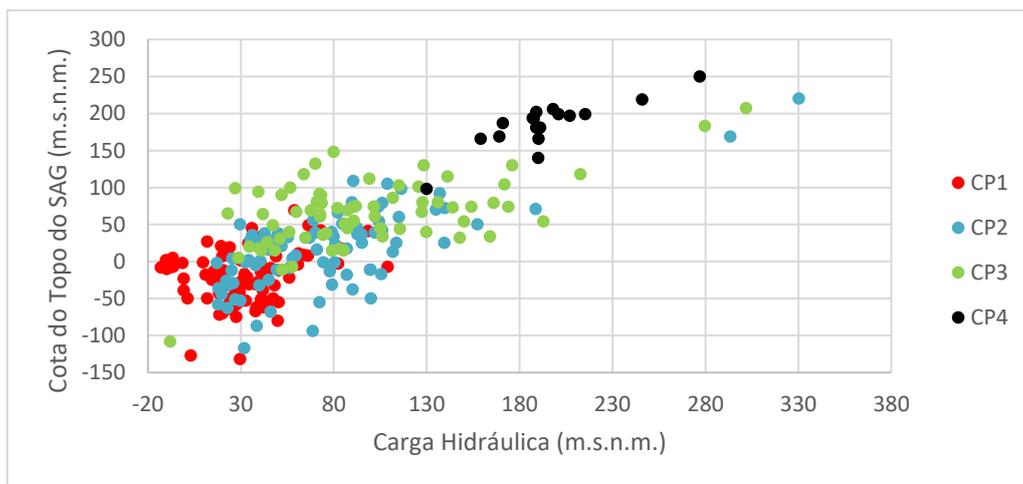
Figura 39 - Mapa de superfície potenciométrica, em m.s.n.m.



Com relação às cargas hidráulicas mais baixas, destaca-se o fato de que estas se localizam principalmente nos vales dos rios Taquari, Caí e Sinos, onde se encontram as principais estruturas.

Na área de estudo, o nível estático possui uma tendência de acompanhar a cota do topo do SAG, que por sua vez se relaciona com o relevo, isso ocorrendo tanto regionalmente, quanto, em menor grau, em cada compartimento (Figura 40).

Figura 40 - Relação entre a cota do topo do SAG e a carga hidráulica.

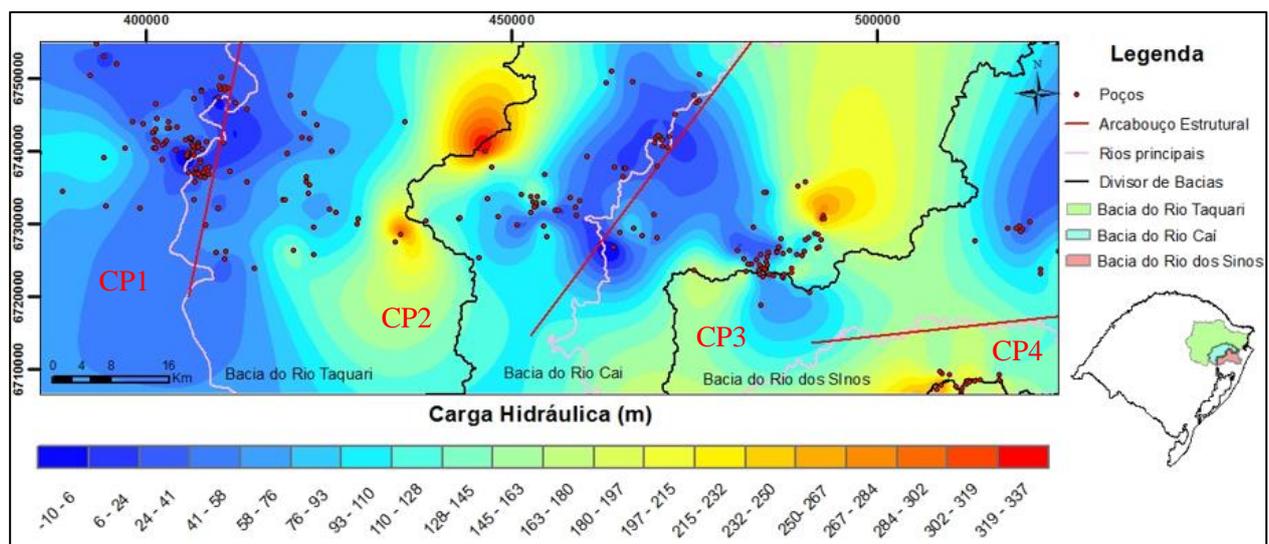


Dessa forma, o fluxo de água subterrânea tende a seguir dos altos potenciométricos que, em geral, coincidem com as maiores altimetrias da região, em direção aos principais rios,

como o Taquari, Caí e Sinos, nas bordas dos compartimentos, que funcionam como grandes áreas de descarga.

Levando em consideração as principais bacias hidrográficas da região em estudo (Taquari, Caí e Sinos), foi observado que os divisores dessas bacias estão posicionados muito próximos aos altos potenciométricos, indicando um comportamento similar do fluxo de água superficial e subterrâneo em direção as grandes drenagens (Figura 41).

Figura 41 - Relação entre as bacias hidrográficas e a carga hidráulica, em m.s.n.m.



A exceção a essa tendência se deve ao baixo potenciométrico encontrado na região sudeste, entre as bacias do Rio Caí e Rio dos Sinos, onde foi realizado um trabalho em escala de detalhe por Heine (2008), que identificou a ocorrência de superexploração, o que pode estar refletindo nesses valores mais baixos.

5.2.4. Relação da produtividade com a compartimentação

Com relação as capacidades específicas, verificou-se que elas são menores que 1 m³/h/m em 56% dos poços analisados, localizados principalmente nos compartimentos CP3 e CP4, onde 60% das capacidades específicas estão abaixo do primeiro quartil (0,25 m³/h/m). Com exceção de um poço encontrado em CP3, todos os demais casos com valores acima do terceiro quartil (1,65 m³/h/m), estão localizados em CP1 e CP2, com presença de vazões superiores à 4 m³/h/m, chegando a até 9,73 m³/h/m. A Tabela 4 apresenta um detalhamento

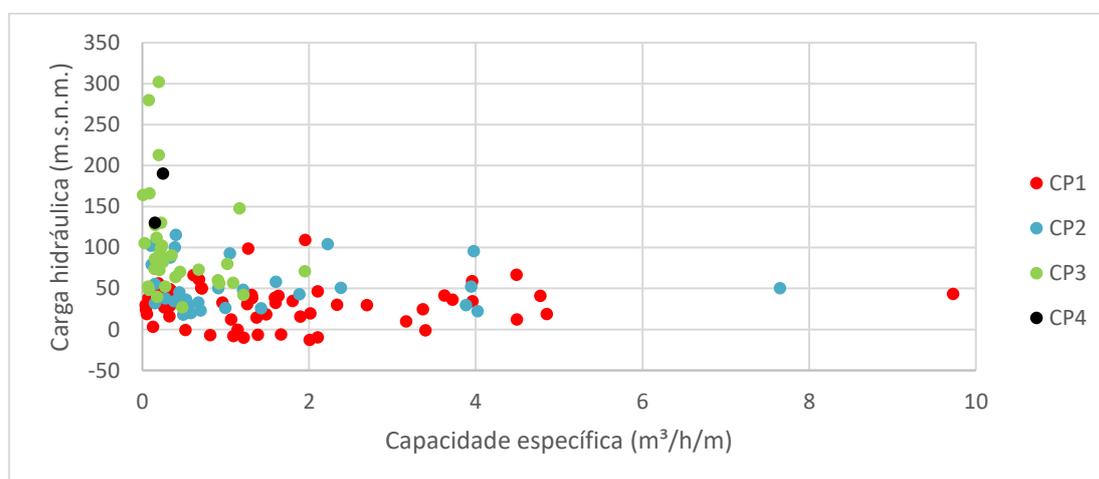
com os valores máximos, médios, mínimos e medianos encontrados em cada um dos compartimentos.

Tabela 4 - Estatística das capacidades específicas, em m³/h/m.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Máximo	9,73	7,66	1,95	0,25
Médio	1,77	1,42	0,42	0,20
Mediana	1,32	0,67	0,23	0,20
Mínimo	0,04	0,11	0,01	0,15

Verificou-se também a existência de uma grande amplitude de valores de produtividades para as cargas hidráulicas que se posicionadas abaixo dos 50 m.s.n.m. (Figura 42), porém, vale destacar que as maiores produtividades se encontram, quase que exclusivamente, para as cargas hidráulicas abaixo desse patamar, que corresponde aos níveis de água dos rios onde se localizam as principais estruturas da região. Além disso, boa parte dos poços onde se observou valores mais elevados de capacidade específica se encontram nas áreas que margeiam os rios Taquari e Caí, que correspondem a duas zonas de descarga do aquífero na região.

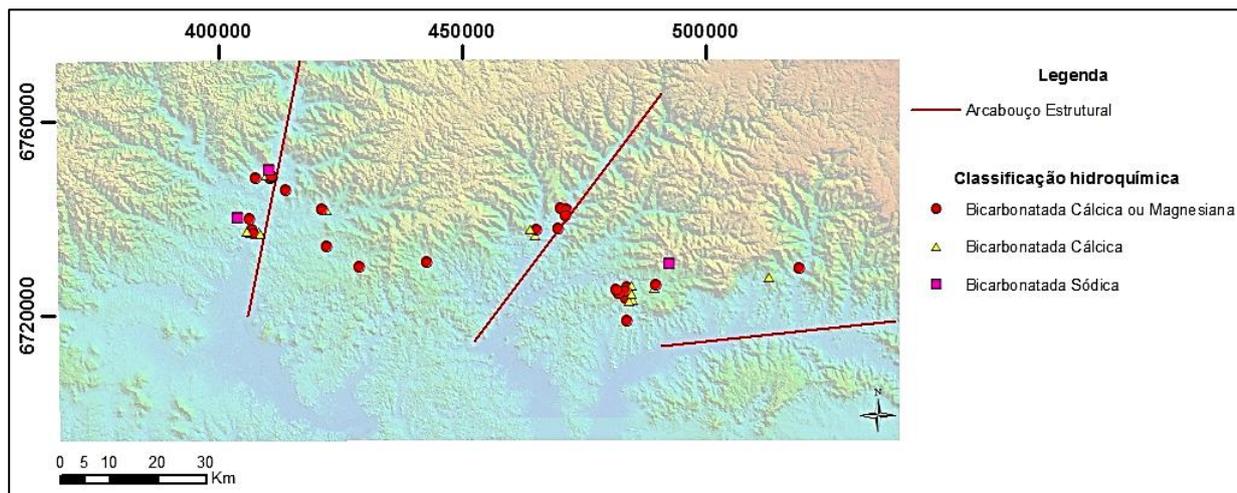
Figura 42 - Relação entre as produtividades dos poços e as cargas hidráulicas.



5.2.5. Relação da hidroquímica com a compartimentação

Com base nos dados hidroquímicos as águas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas (15 poços), bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (25 poços) e bicarbonatadas sódicas (3 poços) (Figura 43).

Figura 43 - Distribuição das classes hidroquímicas na Área da Escarpa.



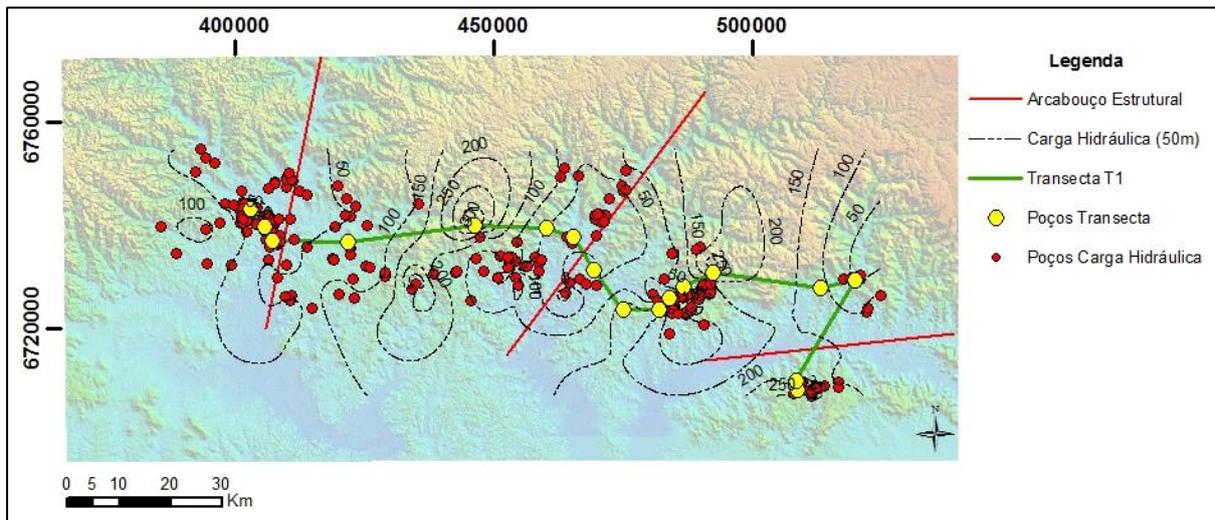
Segundo Giardin e Faccini (2011), as águas bicarbonatadas cálcicas estão associadas nessa região ao aquífero Botucatu, enquanto que para Reginato et al. (2013), na região nordeste do RS, a variabilidade hidroquímica pode ter relação com o grau de confinamento, visto que os autores encontraram águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas em locais com menor confinamento, e as águas bicarbonatadas sódicas em locais com maior confinamento. Apesar de dois dos três poços com águas bicarbonatadas sódicas apresentarem um confinamento relativamente alto, considerando esta área, poços com confinamentos maiores tiveram águas com outras classificações.

Em função da pequena espessura de rochas vulcânicas encontradas na maioria dos poços, é provável que o SAG esteja sendo recarregado a partir das fraturas das rochas confinantes, proporcionando essa característica hidroquímica encontrada. Além disso, vale destacar que não foram observados poços com informações físico-químicas no compartimento CP4 que permitissem uma análise das características das águas.

5.2.6. Modelo hidrogeológico conceitual para a Área da Escarpa

O modelo conceitual é representado no perfil hidrogeológico, que foi elaborado a partir da transecta T1 (Figura 44), e buscou representar o fluxo de água subterrânea na região. Desse modo, foram utilizados como referência 17 poços, de modo a representar a região ao longo dos 4 compartimentos delimitados (Figura 45). A validação do modelo foi feita a partir da utilização de dados de outros poços existentes na região, levando em consideração os valores para as cargas hidráulicas e o relevo.

Figura 44 - Poços utilizados na elaboração da transecta T1.

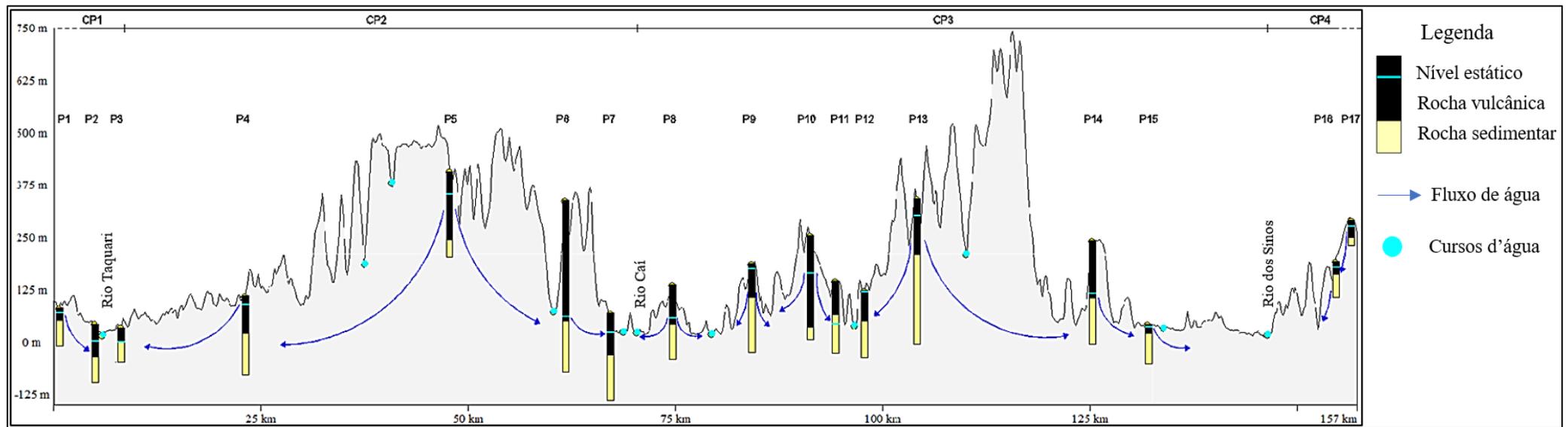


Do modelo proposto, temos que o fluxo segue das regiões mais altas topograficamente em direção aos limites dos compartimentos, acompanhando, em geral, o topo do SAG. Ao longo do caminho, são encontradas várias quebras de relevo, algumas com grandes amplitudes, além da presença de alguns rios de pequeno porte, que estão funcionando como zonas de descarga do aquífero. Isso indica que, nessa região, o SAG comporta-se como um aquífero livre, mesmo sendo recoberto na maior parte da área por espessuras variáveis de rochas vulcânicas.

Nas áreas mais planas, nos vales, a cota dos grandes rios se encontra muito próxima dos níveis estáticos, o que proporciona uma maior produtividade aos poços. Por outro lado, as áreas mais elevadas, próxima a quebras de relevo acentuadas, coincidem com os locais onde foram observadas baixas produtividades dos poços. Isso pode ter relação as linhas de fluxo mais profundas, com as regiões próximas aos rios funcionando como grandes zonas de descargas do aquífero.

É possível observar que a variação do topo do SAG tende a acompanhar o relevo da região, enquanto que a espessura das rochas vulcânicas apresenta uma grande heterogeneidade, independente do compartimento analisado, assumindo valores não muito elevados.

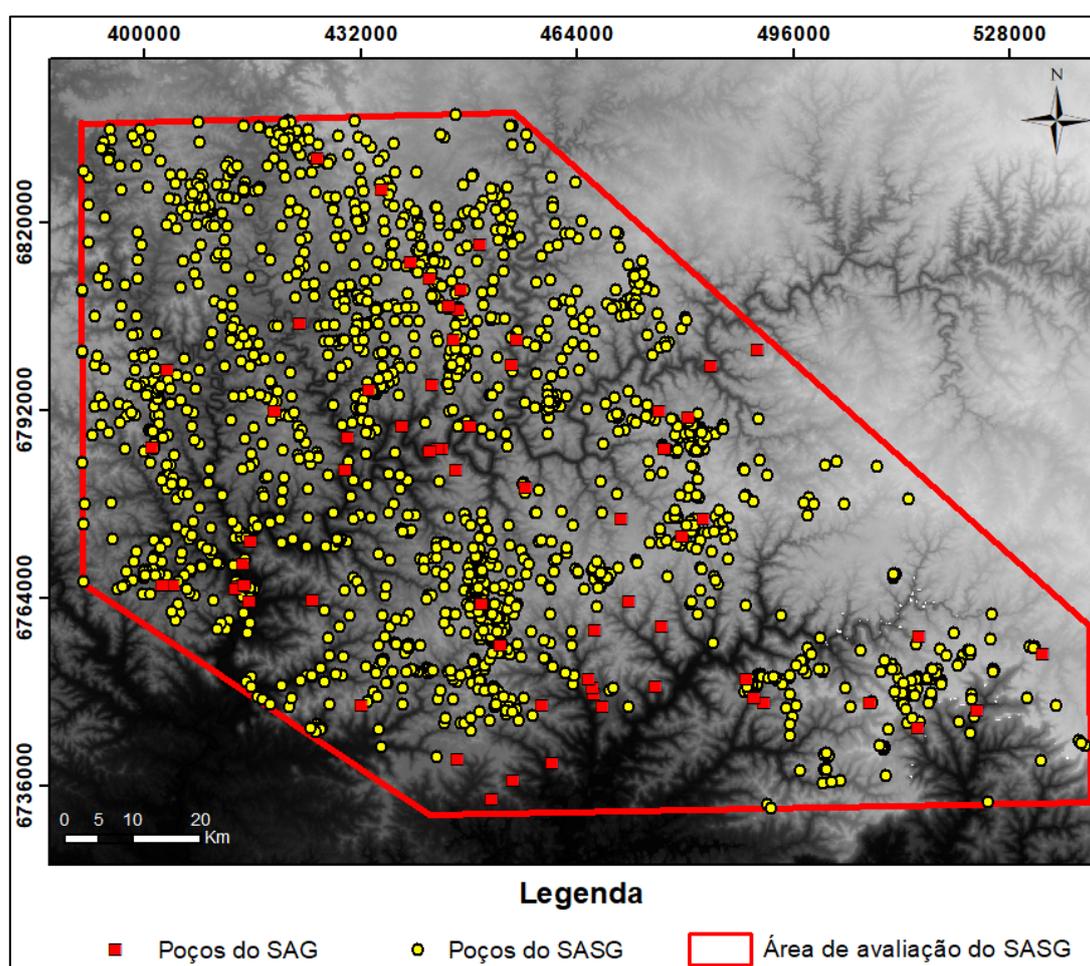
Figura 45 - Perfil representativo do modelo hidrogeológico conceitual para a Área da Escarpa.



5.3. Estudo da Área do Planalto

A Área do Planalto está localizada entre as coordenadas UTM sul 6754819 e 6706744, e UTM leste 385298 e 524874, e possui na sua área de abrangência 68 poços tubulares referentes ao SAG, e 1.793 poços do SASG (Figura 46). As principais características dos poços do SAG são detalhadas nos Anexos A e C. Já nos Anexos B e D são apresentadas as informações dos poços do SASG que possuem dados físico-químicos completos, e que foram utilizados na avaliação das interações.

Figura 46 - Localização dos poços utilizados nas análises para a Área do Planalto.



5.3.1. Caracterização estrutural

Os traçados de lineamentos foram realizados para as duas escalas, 1:1.000.000 e 1:250.000, proporcionando um total de 747 e 9.768 lineamentos, respectivamente. Apesar das maiores estruturas terem sido identificadas principalmente para a escala de 1:1.000.000, com

dimensões que chegam a até 66 km, verificou-se a existência de uma representatividade desses grandes lineamentos na forma de conjuntos de traçados de menor porte obtidos a partir da escala 1:250.000. A Tabela 5 apresenta as características quanto as dimensões dos lineamentos traçados para cada uma das escalas.

Tabela 5 - Estatística dos comprimentos dos lineamentos, em metros.

Escala	1:1.000.000	1:250.000
Máximo	65.901,10	13.127,80
Mínimo	1.314,89	167,34
Média	7.802,93	1.303,91
Mediana	6.120,73	975,74
Desvio Padrão	6.518,32	1.042,35

Os lineamentos traçados para a escala 1:1.000.000 apresentaram direções preferenciais N50W, N60-80W, N50E, N80E e E-W, e secundárias N-S e N30W (Figura 47). Já para a escala 1:250.000 as direções preferenciais são N-S e E-W, e as secundárias são as N30-40W e N70E (Figura 48).

Figura 47 - Lineamentos traçados para a escala 1:1.000.000 e seu diagrama de rosetas.

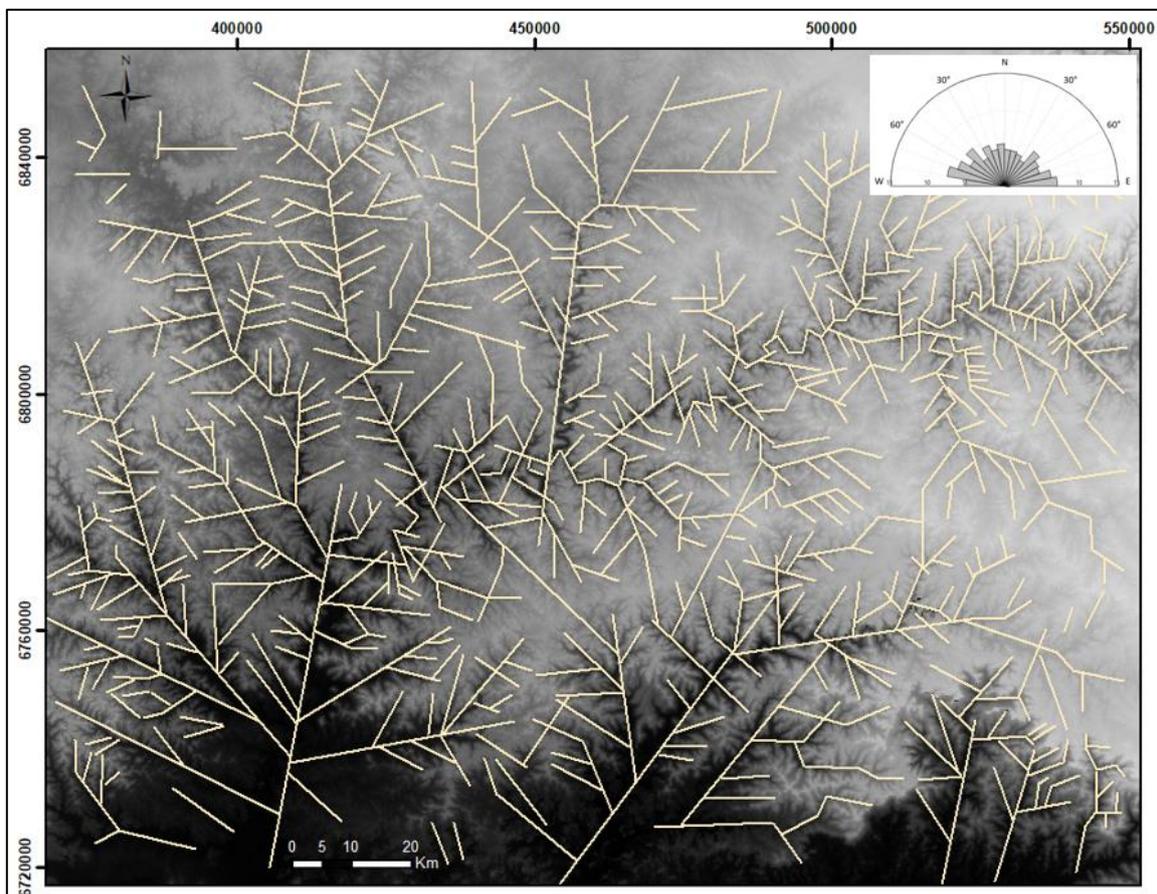
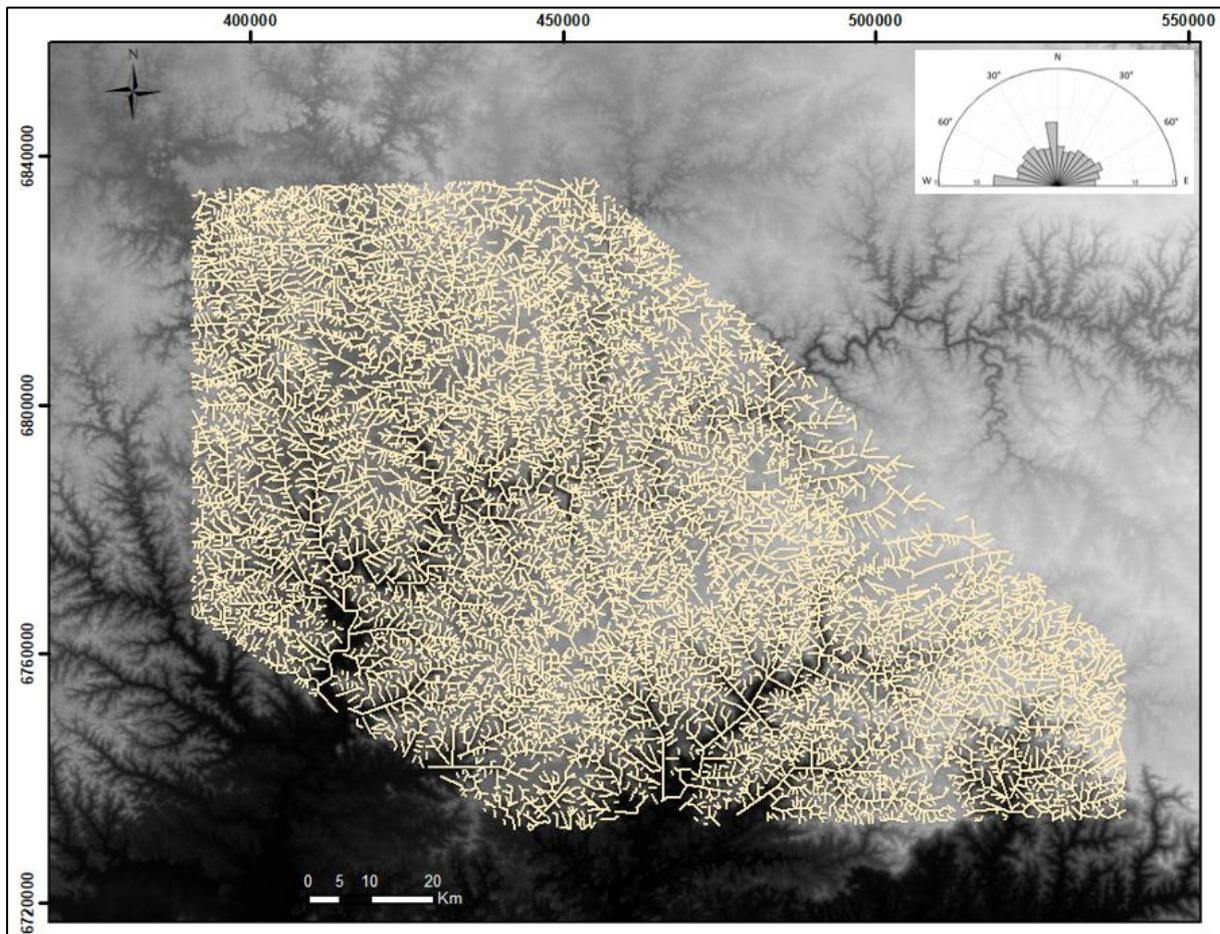


Figura 48 - Lineamentos traçados para a escala 1:250.000 e seu diagrama de rosetas.

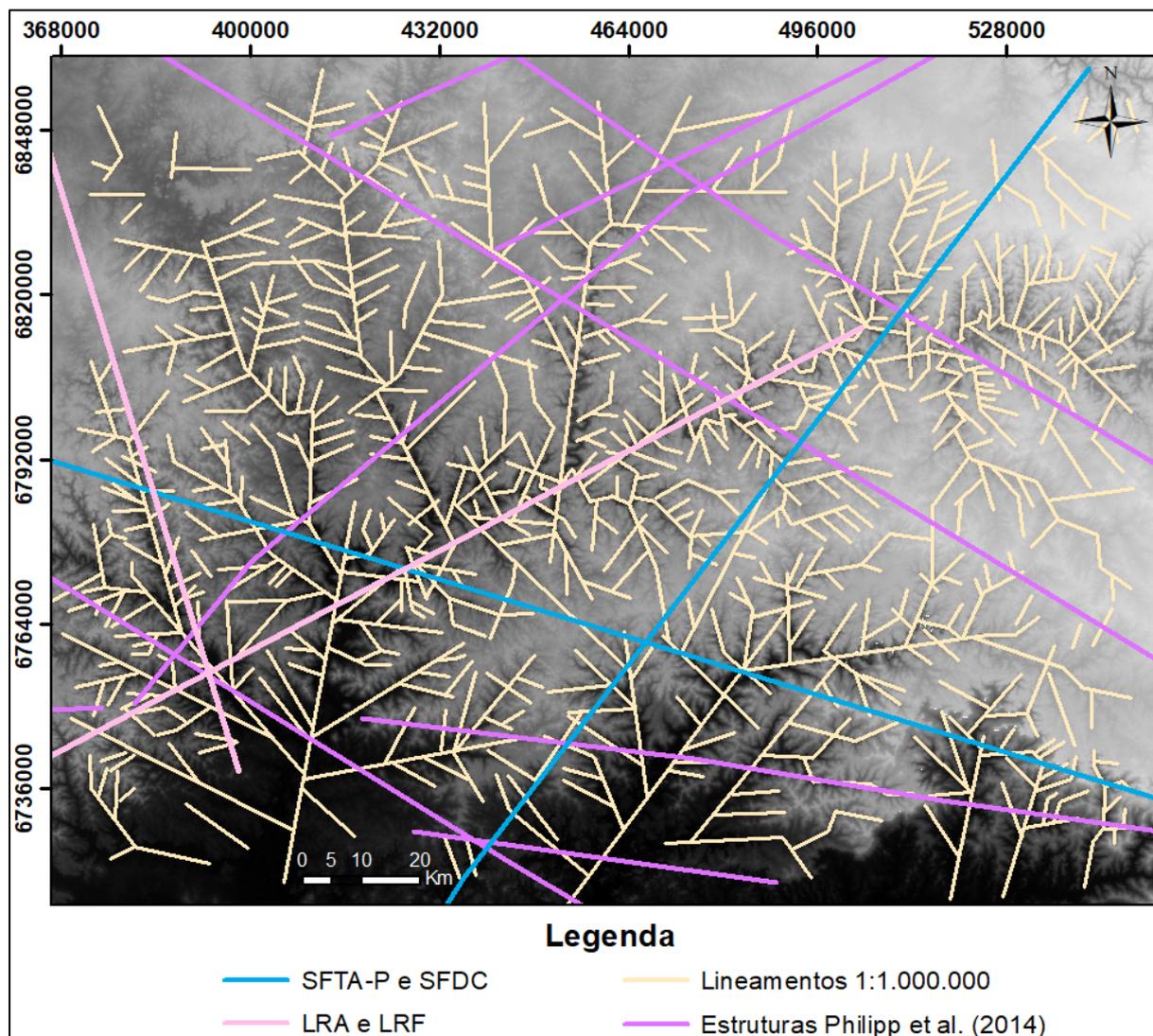


Essas direções, principalmente as que se referem à escala 1:250.000, se mostraram similares às encontradas para o traçado dos lineamentos realizados para a Área da Escarpa, demonstrando que o processo que influenciou na formação dessas estruturas teve atuação sobre toda a região.

Tomando como base as grandes estruturas regionais observadas por outros autores para a área de estudo, temos que os lineamentos identificados com orientação NW possivelmente tenham influência do Sistema de Falhas Terra de Areias – Posadas (SFTA-P) e do Sistema de Falhas Torres Posadas. Os lineamentos NE podem ter relação com a Zona de Falha Blumenau/Soledade, com Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu (SFDC) e com o Lineamento Rio das Antas (LRA) (Figura 49).

Os lineamentos E-W e N-S, que se destacam nas duas escalas analisadas, correspondem na região, segundo Reginato e Strieder (2006a), a dois importantes campos de esforços tensionais, que segundo Zalán et al. (1990), tem relação com o processo de separação entre a América do Sul e a África.

Figura 49 - Traçado representando os lineamentos de 1:1.000.000, e as falhas e sistemas de falhas identificadas por outros autores para a região.



Foram elaborados os mapas de densidade de lineamentos para as duas escalas de análise. Para a escala de 1:1.000.000 verificou-se que os locais com maior densidade coincidem com as áreas dos grandes vales, onde foram identificadas as estruturas de maior porte (Figura 50). Vale destacar que boa parte das densidades acima do terceiro quartil estão localizadas sobre o Vale do Rio das Antas, proporcionando nessa área um alto grau de estruturação do aquífero.

Já para a escala de 1:250.000, as maiores densidades de lineamentos estão posicionadas principalmente nas áreas próximas aos vales menos dissecados, em regiões topograficamente mais elevadas, com destaque principalmente para a porção norte da área de estudo (Figura 51).

Figura 50 - Mapa de densidade de lineamentos para a escala 1:1.000.000.

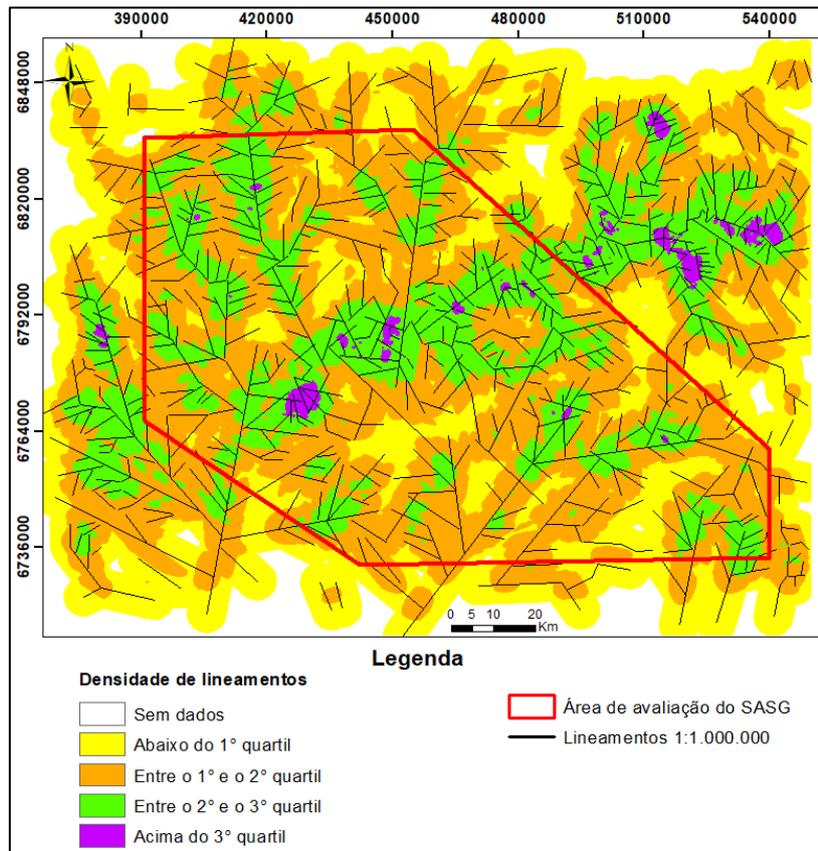
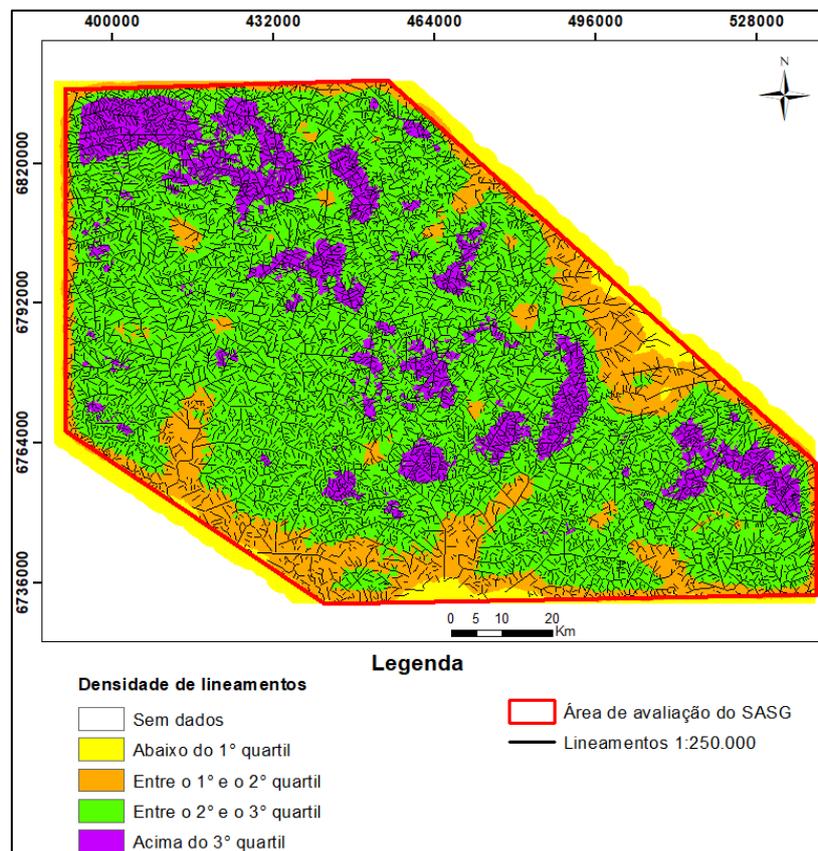


Figura 51 - Mapa de densidade de lineamentos para a escala 1:250.000.



5.3.2. Caracterização geológica

Diferentemente da Área da Escarpa, na Área do Planalto raramente verificou-se a tendência do topo do SAG de acompanhar o relevo, indicando, de maneira geral, a atuação de outros processos como os responsáveis por essas variações (Figura 52). Isso fica mais evidente ao relacionar as variações do topo do SAG com as espessuras das rochas vulcânicas, onde verificou-se uma grande variação do topo para o mesmo valor de espessura (Figura 53).

Figura 52 - Relação entre o topo do SAG e a cota do terreno.

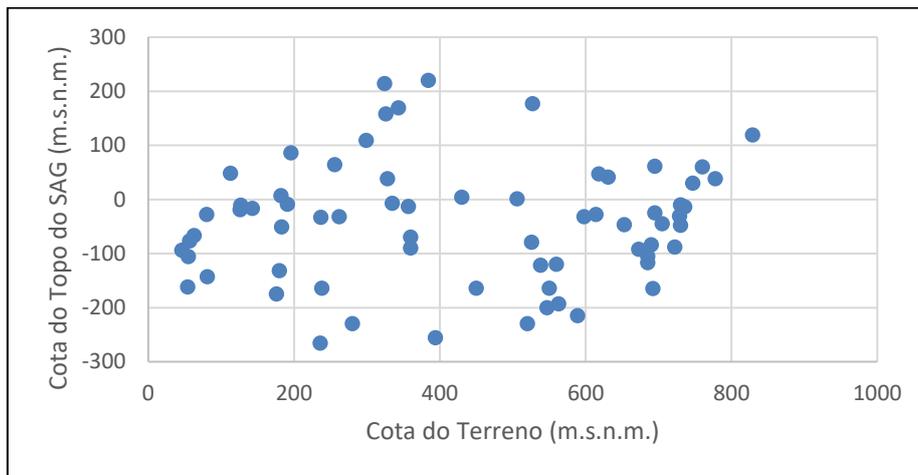
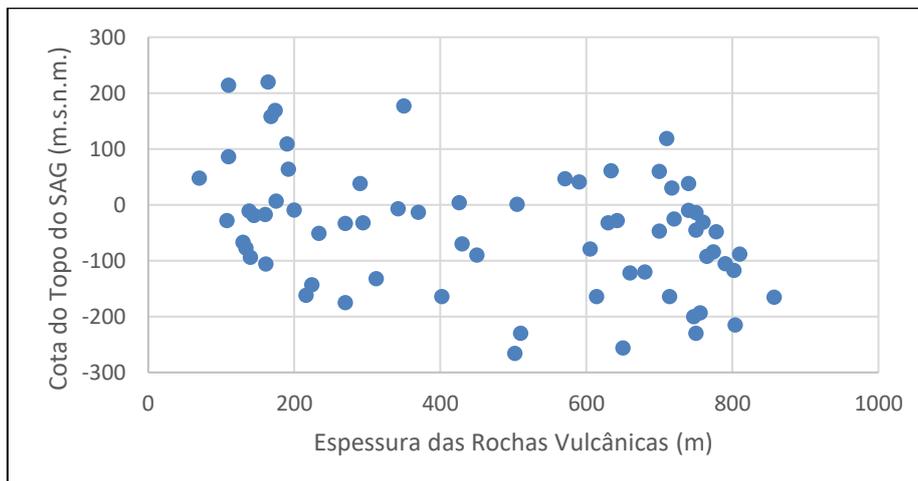


Figura 53 - Relação entre o topo do SAG e a espessura das rochas vulcânicas.



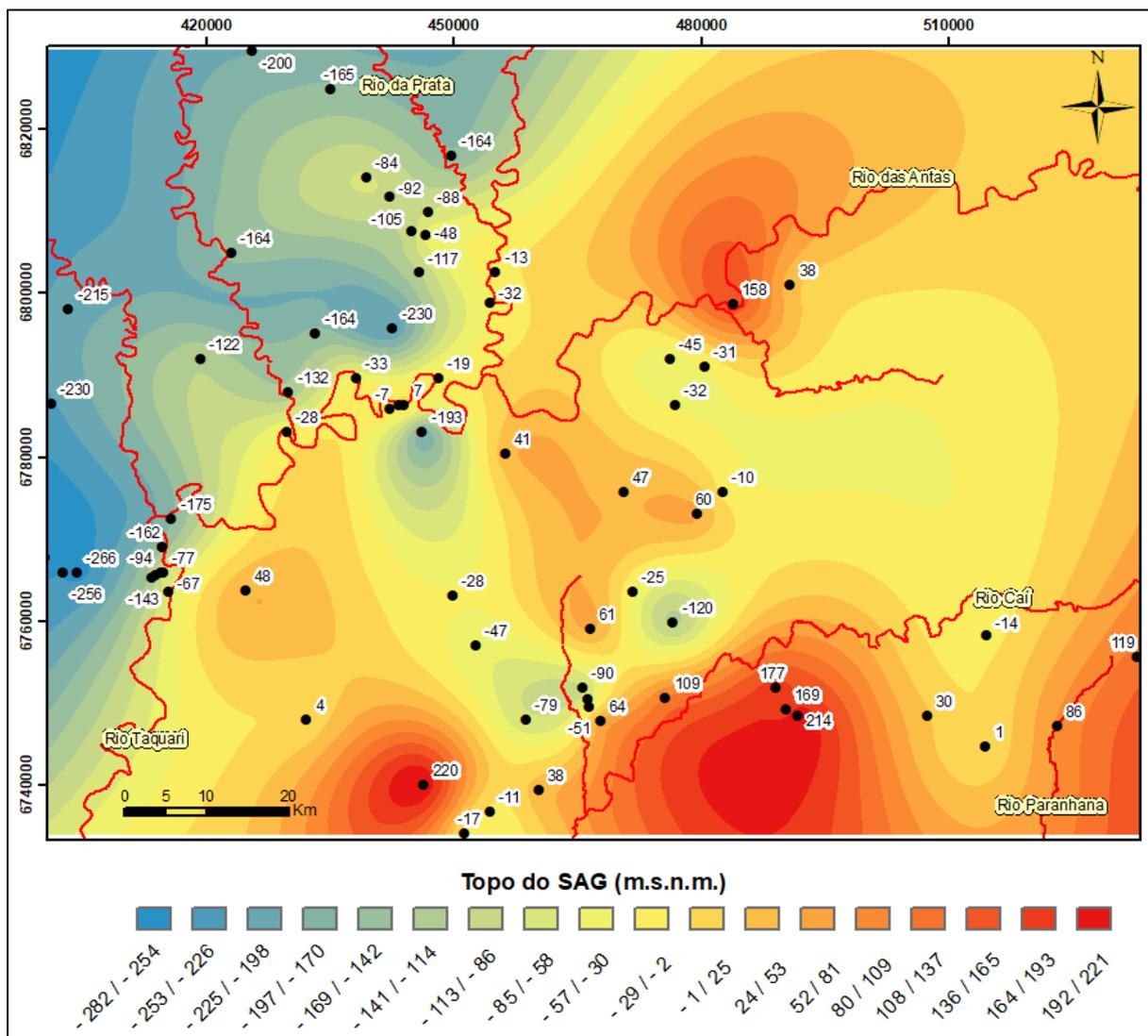
A cota do topo do SAG apresentou uma grande variação ao longo da Área do Planalto (Tabela 6), com destaque para quatro áreas onde o topo do SAG se encontra em cotas muito elevadas, acima dos 150 m.s.n.m., sendo três delas na porção sul, próximo das escarpas, e uma à nordeste, no Vale do Rio das Antas. Entre essas áreas ao sul foram observadas algumas áreas mais baixas do topo, como no Vale do Rio Caí e no Vale do Rio Paranhana. Além disso,

na região central também foram observadas cotas altas, porém em um nível menor, próximo dos 60 m.s.n.m. Chama a atenção entre as áreas altas das bordas e da porção central, da existência de vários locais com presença de cotas negativas, indicando uma alternância na região entre cotas altas e baixas. Já na porção oeste verificou-se um decréscimo significativo do topo do SAG, passando para valores menores que -200 m.s.n.m. (Figura 54).

Tabela 6 - Estatística para o topo do SAG para a Área do Planalto.

	Cota do Topo do SAG (m.s.n.m.)
Máxima	220
Mediana	-32,5
Média	-43,81
Mínima	-266

Figura 54 - Variação do topo do SAG na Área do Planalto, com os cursos d'água sendo representados em vermelho.



É importante frisar que o mapa da Figura 54 não representa com exatidão todas as variações do topo do SAG na região, com as quebras existentes no topo sendo suavizadas a partir da interpolação dos dados. Porém, a identificação de várias áreas altas e baixas produz informações muito relevantes para a posterior avaliação da atuação das estruturas nessas variações.

O comportamento verificado para o topo do SAG se mostra coerente com o observado por Machado (2005a), com redução das cotas no sentido NE-SW, e presença de áreas elevadas na borda sul, além da existência de um decréscimo em direção à oeste. Porém, a análise de maior detalhe demonstra a existência de algumas particularidades na região, como a presença de cotas muito baixas na porção central, assumindo em alguns casos valores negativos, menores que -100 m.s.n.m., e a alternância de áreas com o topo mais alto e mais baixo na região noroeste.

Outro detalhe que chama a atenção são as características do topo do SAG nas áreas posicionadas próximas à calha dos grandes rios. No trecho à montante do Rio da Prata o topo do SAG se apresenta em grande profundidade, com cota de -164 m.s.n.m., enquanto no trecho a jusante, as cotas são mais elevadas (-13 e -32 m.s.n.m.). Essa mesma tendência de cotas pouco negativas também foi verificada no Vale do Rio das Antas, com exceção da área à montante da intersecção com o Rio da Prata, onde foi verificada uma cota de 158 m.s.n.m. Já no Vale do Rio Taquari o topo do SAG apresenta uma grande variação, com valores entre -67 e -175 m.s.n.m, com decréscimo em direção à oeste.

Por outro lado, a espessura das rochas vulcânicas se mostrou um parâmetro intimamente relacionado com a topografia da região (Figura 55). Verificou-se que as menores espessuras foram encontradas nas áreas localizadas próximas às calhas dos rios da região e nas áreas próximas das escarpas, enquanto que os maiores pacotes de rochas se situam nas regiões mais elevadas topograficamente (Figura 56). As espessuras das rochas vulcânicas variaram de 70 a 857 m, com valores médios de 470 m, e mediana de 504 m.

Relacionando as espessuras das rochas vulcânicas com o mapa geológico do RS (CPRM, 2006) (Figura 57), verificou-se que, de maneira geral, os maiores pacotes de rochas se localizam nas áreas de ocorrência dos derrames ácidos das Fácies Caxias e Várzea do Cedro, enquanto os menores foram encontrados nas faixas de ocorrência dos derrames básicos da Fácies Gramado. A exceção ocorre nos poços à oeste do Rio Taquari, no município de Nova Bréscia, que possuem grande espessura de rochas mesmo sobre os derrames da Fácies Gramado.

Figura 55 - Relação entre a espessura das rochas vulcânicas e a cota do terreno.

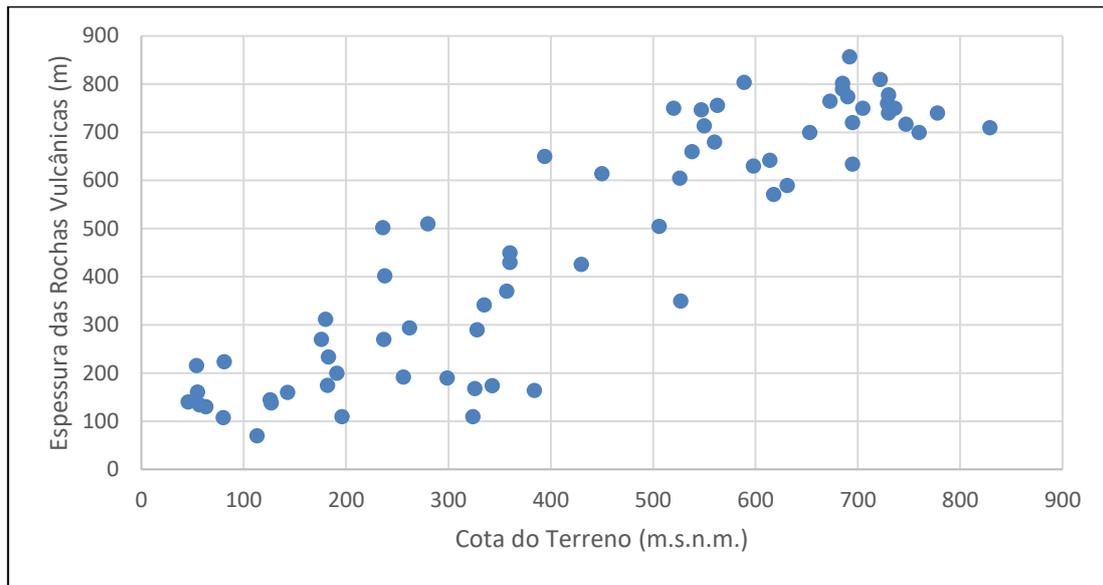


Figura 56 - Distribuição da espessura das rochas vulcânicas, em metros.

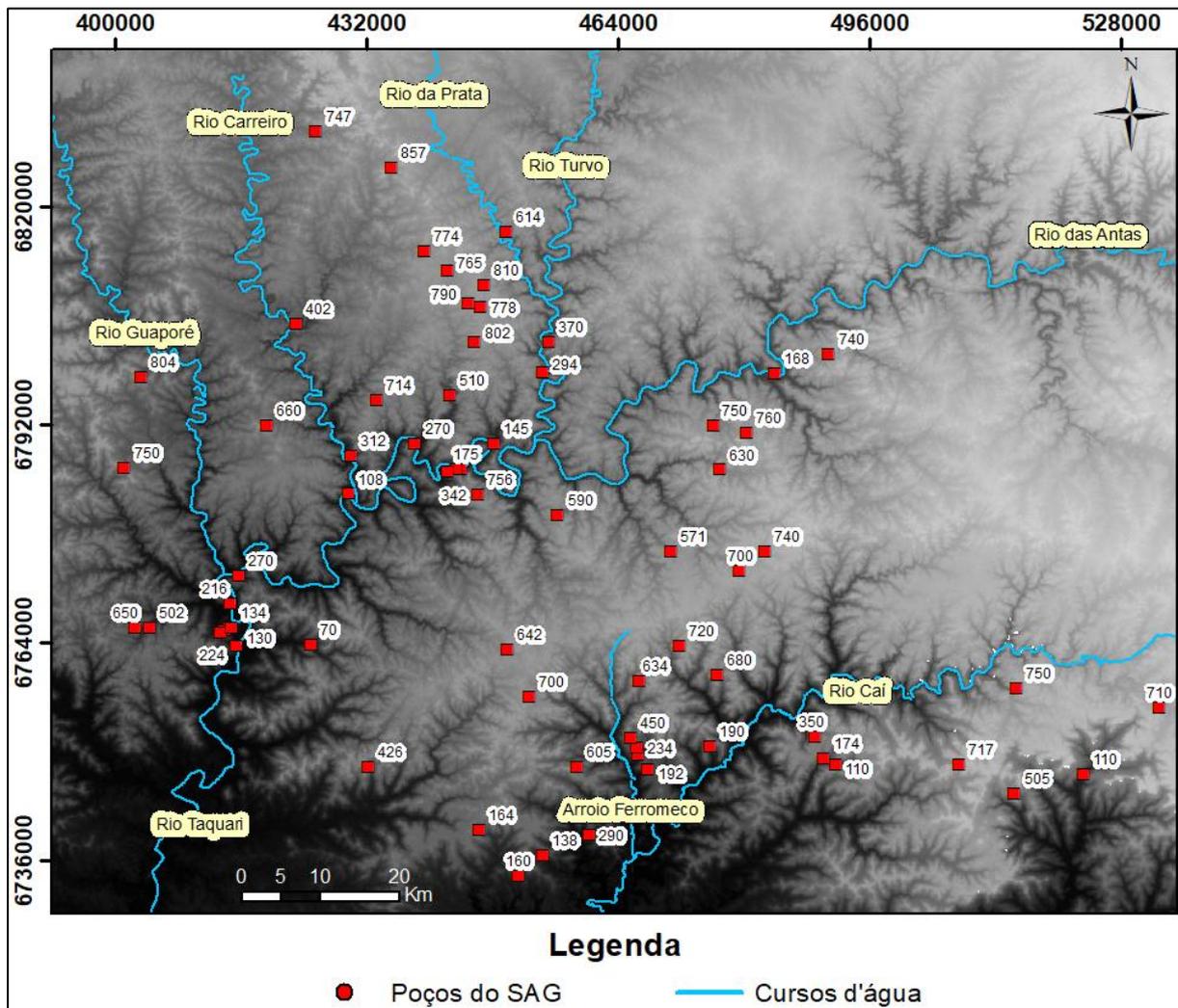
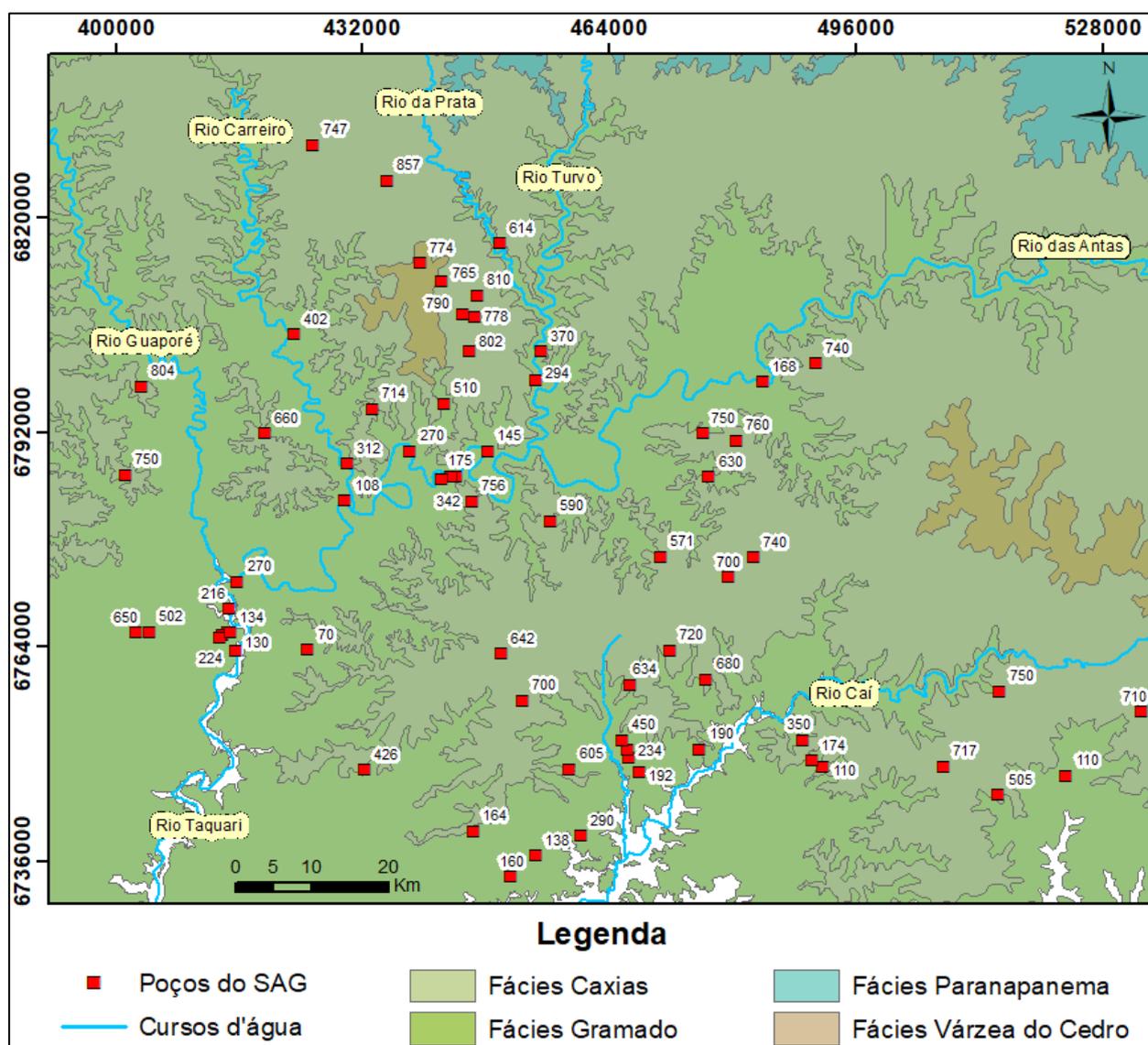


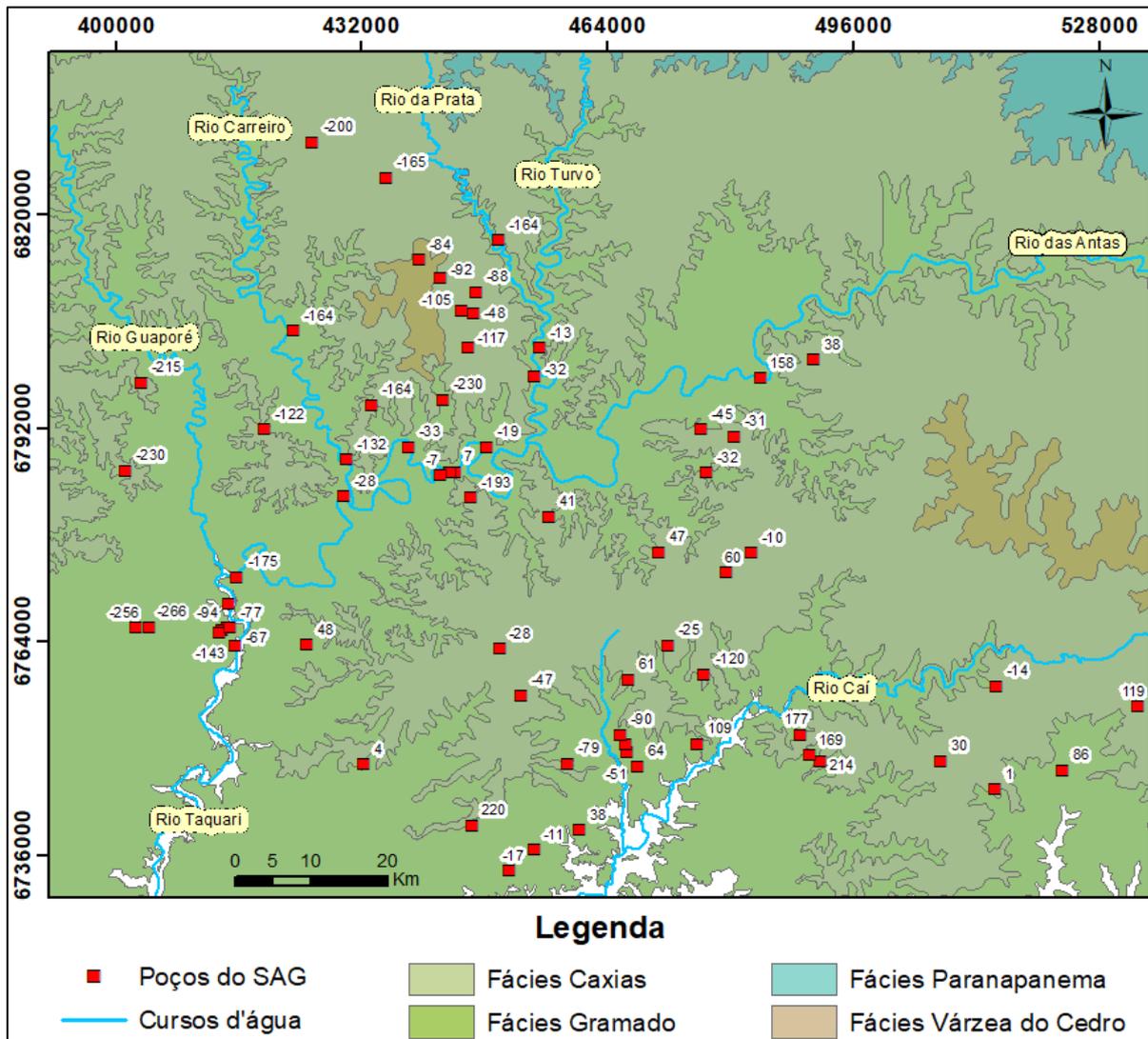
Figura 57 - Espessura das rochas vulcânicas, em metros, sobre o mapa geológico do RS.



Essa característica, porém, não se repete na avaliação do topo do SAG, visto que não foi possível identificar qualquer relação entre os diferentes tipos de derrames vulcânicos e a variação do topo do SAG ao longo da área (Figura 58), indicando uma influência maior da atuação estrutural na região.

O conjunto dessas características observadas para o topo do SAG e para as espessuras das rochas vulcânicas reforçam o indício de influência de outros fatores na sua variação ao longo da área de estudo, como a atuação de estruturas que poderiam proporcionar a movimentação desses pacotes de rochas, bem como de processos erosivos, que ao longo do tempo abriram a calha dos rios.

Figura 58 - Cota do topo do SAG, em m.s.n.m., sobre o mapa geológico do RS.



5.3.3. Caracterização hidrogeológica

5.3.3.1. Caracterização hidrogeológica do SASG

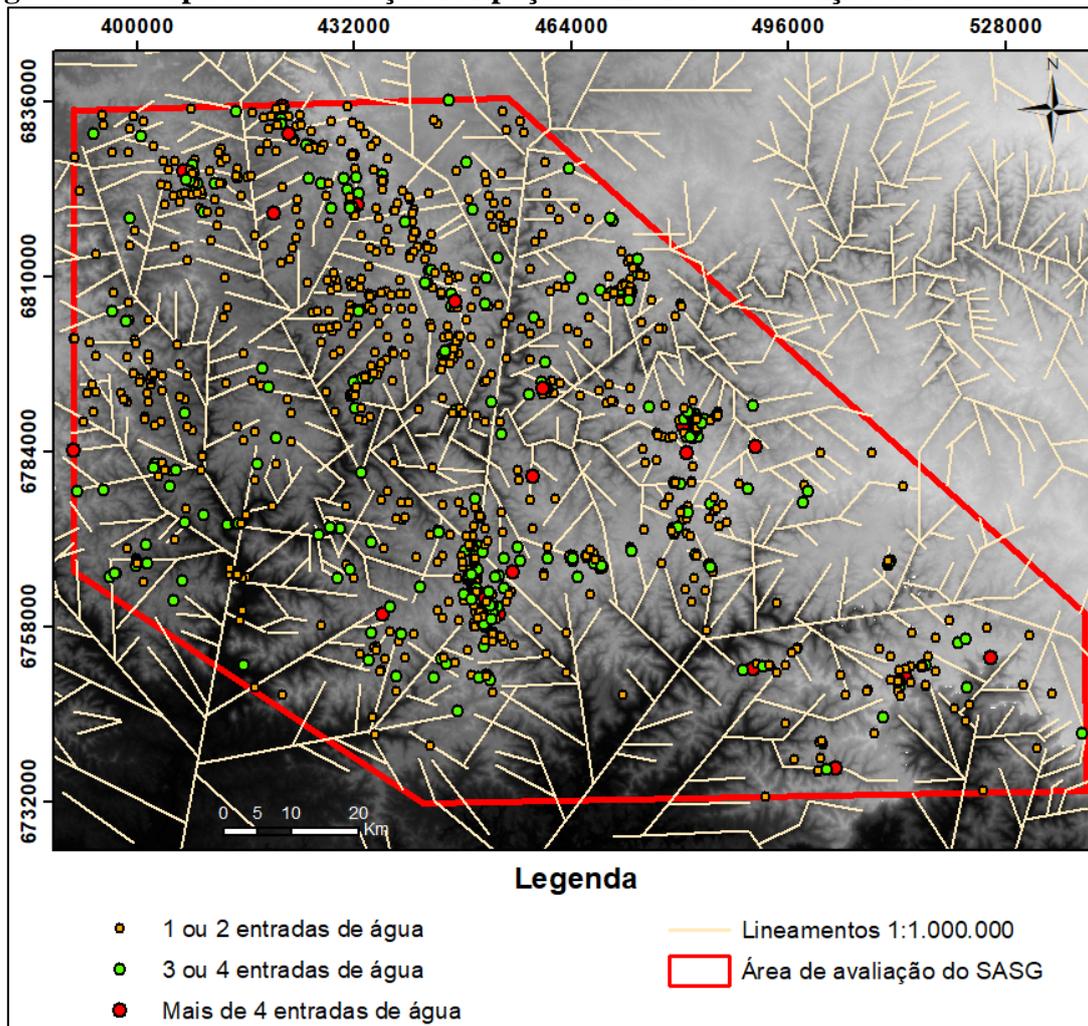
O levantamento feito com base nos relatórios de perfuração dos poços do SASG mostram que na grande maioria dos poços (74%) a contribuição ocorre por uma ou duas fraturas produtoras. Apesar disso, não são raros os casos com a presença de muitas entradas de águas (EA) (Tabela 7).

Especialmente, verificou-se que os poços que possuem até duas entradas de água estão localizados majoritariamente nos altos dos morros, distantes dos vales. Já os poços com cinco ou mais entradas se encontram próximos de grandes estruturas (Figura 59).

Tabela 7 – Estatística das entradas de águas dos poços do SASG.

N° de Entradas de água	N° de Poços	%
1	455	42,44%
2	339	31,62%
3	185	17,26%
4	65	6,06%
5	18	1,68%
6	8	0,75%
7	3	0,28%

Figura 59 - Mapa de distribuição dos poços do SASG com relação ao número de EA.



Com relação a profundidade das entradas de água, 77% delas se encontram a até 100 m, com raros casos em que essa profundidade é maior que 200 m (Tabela 8). O valor máximo encontrado de 300 m coincide com o limiar apresentado por Hausmann (1995), a partir do qual as fraturas tendem a se apresentar fechadas, por conta das pressões litostáticas. Além disso, os valores médios e da mediana, próximos de 70 m indicam que, em geral, essas entradas ocorrem mais superficialmente (Tabela 9).

Tabela 8 - Profundidade das entradas de água mais profundas dos poços do SASG.

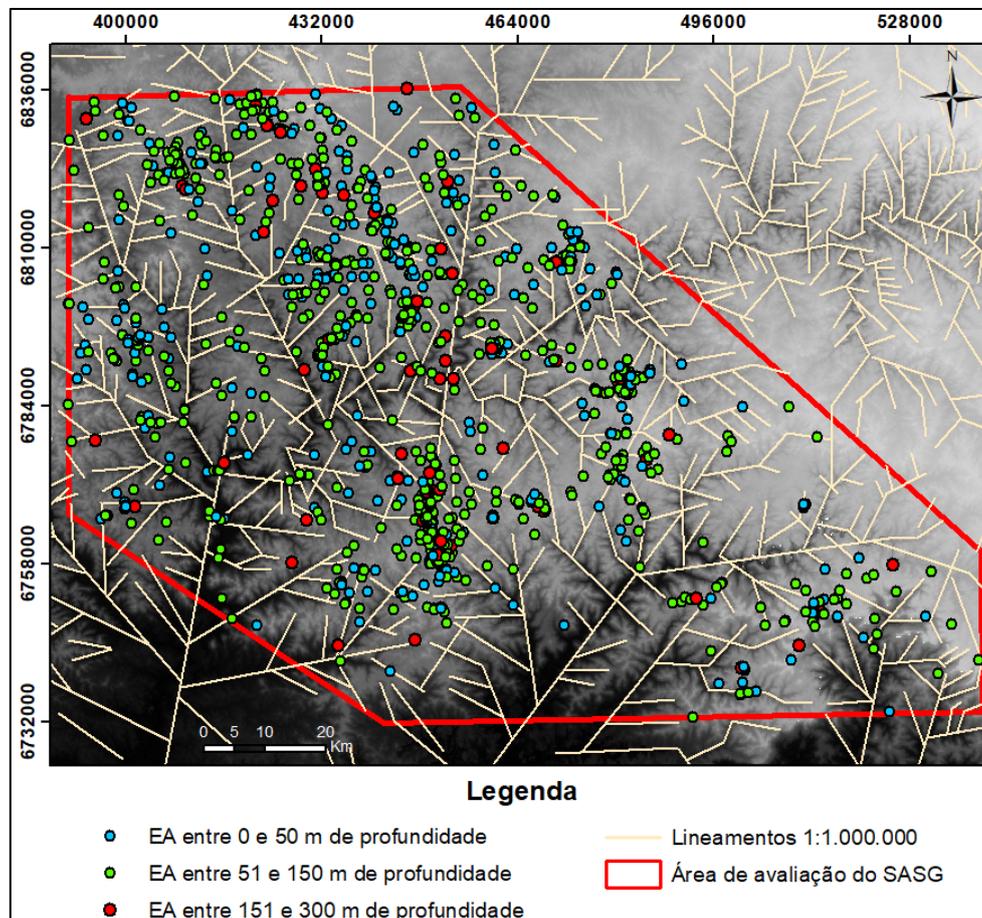
Profundidade das Entradas de água (m)	Nº de Poços	%
0-50	329	30,69%
50,1-100	499	46,55%
100,1-150	175	16,32%
150,1-200	51	4,76%
200,1-250	9	0,84%
250,1-300	9	0,84%

Tabela 9 - Estatística das entradas de água mais profundas dos poços do SASG.

	Profundidade das EA (m)
Mínimo	1,5
Máximo	300
Média	77,00
Mediana	70

Analisando a distribuição das profundidades das entradas de água, verificou-se que os poços com as entradas mais profundas, maiores que 150 m, se encontram próximos das grandes estruturas (Figura 60).

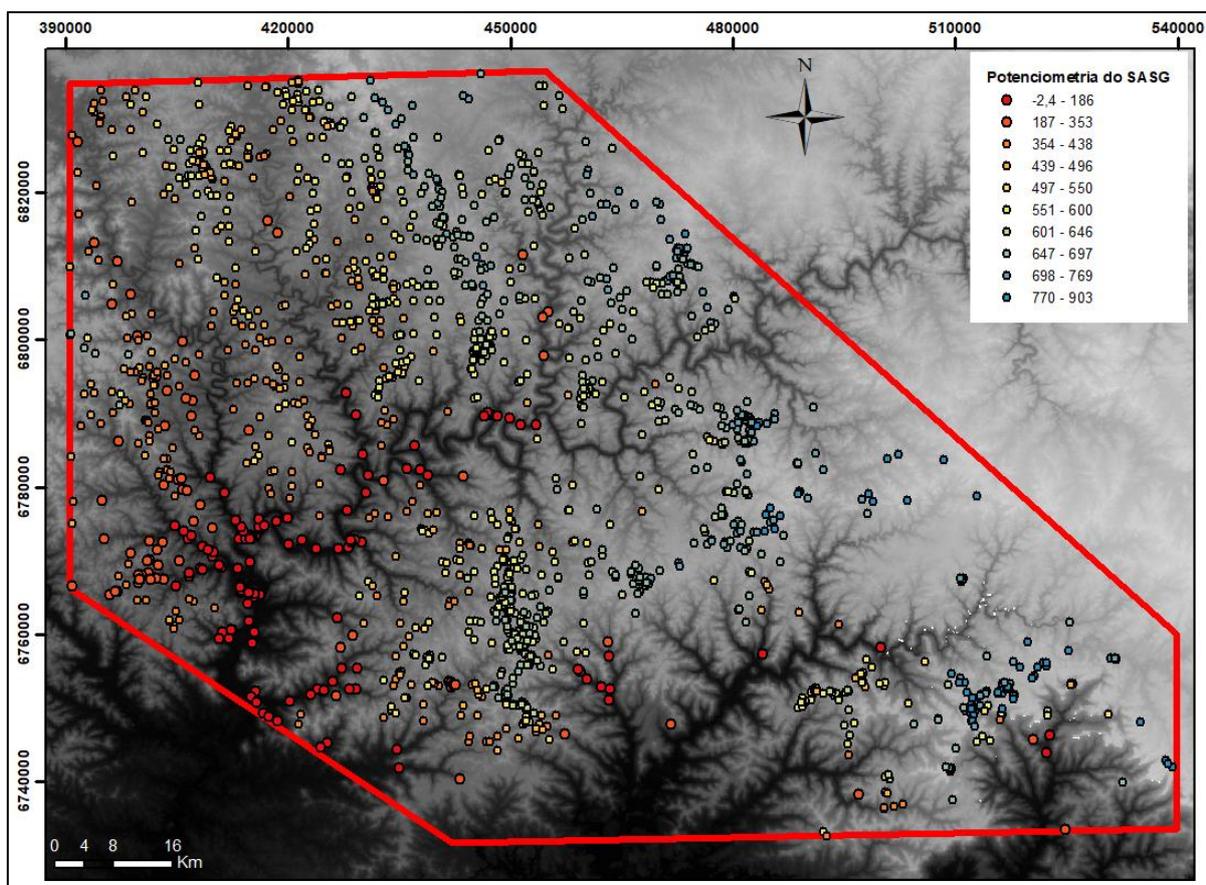
Figura 60 - Mapa de distribuição das profundidades das entradas de água.



Essas características sugerem que nas áreas próximas das grandes estruturas há a ocorrência de um maior grau de fraturamento, proporcionando um incremento tanto na quantidade, quanto nas profundidades das fraturas produtoras.

De maneira geral, verificou-se uma relação da potenciometria do SASG com o relevo, com as menores cargas hidráulicas estando localizadas nos vales, nas regiões mais baixas, enquanto as maiores cargas foram observadas nos altos dos morros (Figura 61).

Figura 61 - Mapa de distribuição das potenciometrias dos poços do SASG, em m.s.n.m.



As informações de vazões (Q) e capacidade específica (q_s) de 632 poços do SASG permitiram a avaliação sobre de que forma este sistema aquífero é explorado nessa região. Na Tabela 10 são apresentadas as principais estatísticas para estes parâmetros, enquanto que nas Figuras 62 e 63 temos a distribuição desses valores ao longo da área de estudo.

A relação entre a capacidade específica (q_s) e o número e profundidade das entradas de água (EA) mostra que um aumento na quantidade de EA não proporciona q_s mais elevadas, visto que os maiores valores foram encontrados para até 3 EA (Figura 64). Além disso, as maiores capacidades específicas foram encontradas em profundidades de EA de até 150 m, reduzindo-se a partir desse patamar (Figura 65).

Figura 62 - Mapa de distribuição das capacidades específicas (qs) do SASG.

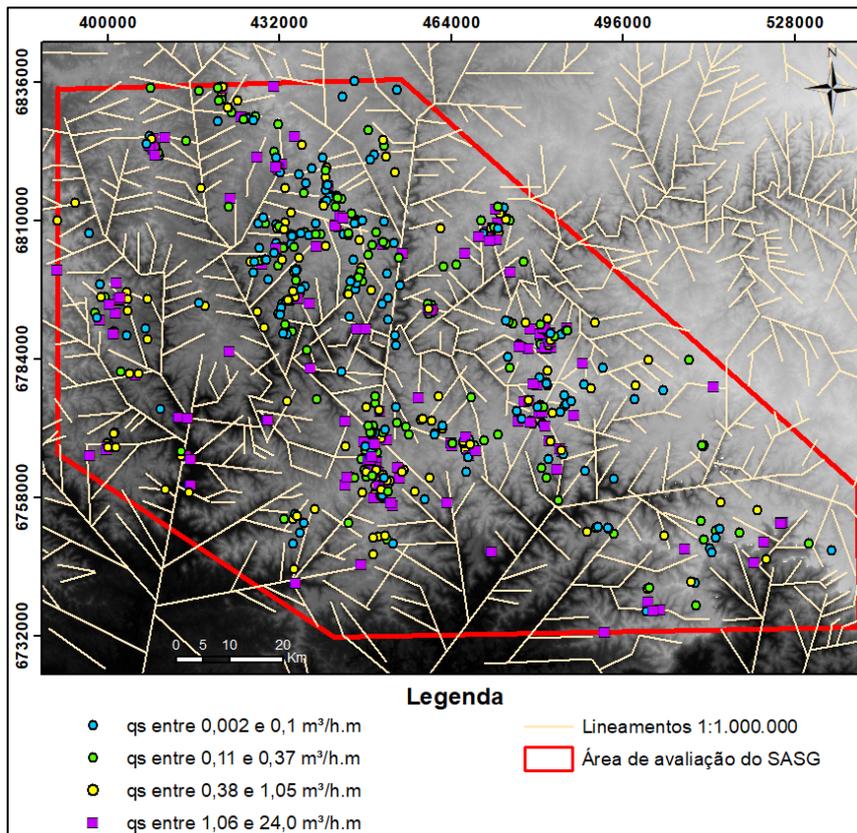


Figura 63 - Mapa de distribuição das vazões (Q) do SASG.

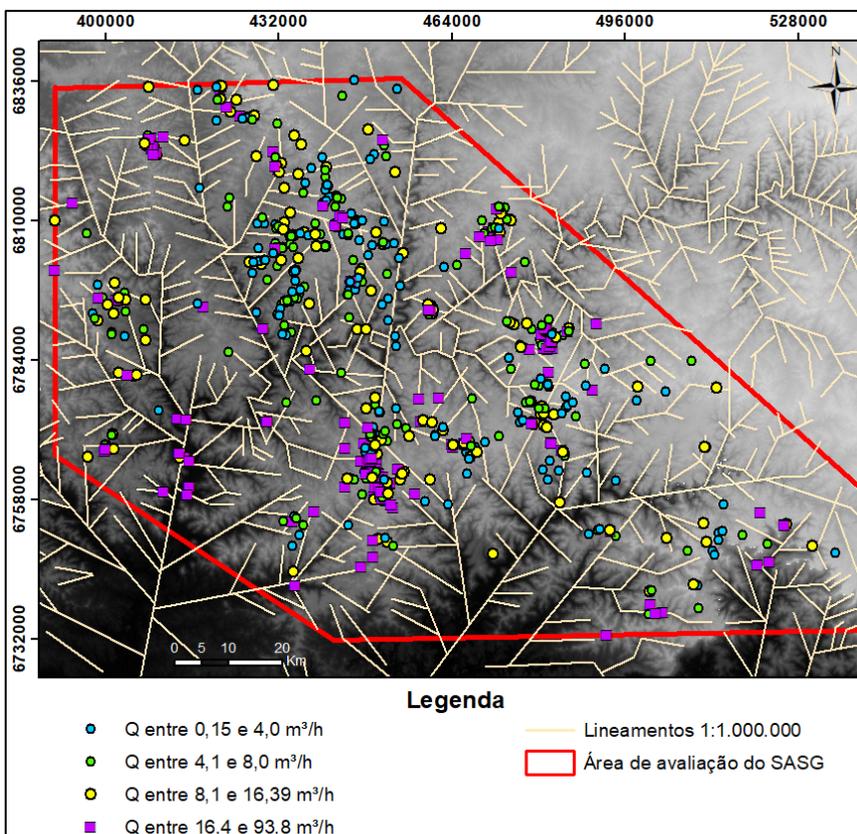


Tabela 10 – Principais estatísticas para as vazões e capacidades específicas do SASG.

	qs (m ³ /h.m)	Q (m ³ /h)
Máximo	24,00	93,80
Mínimo	0,002	0,15
Média	1,02	13,02
Desvio Padrão	2,07	13,78
1° Quartil	0,10	4,00
2° Quartil	0,37	8,00
3° Quartil	1,06	16,40

Figura 64 - Relação entre as capacidades específicas e o número de EA.

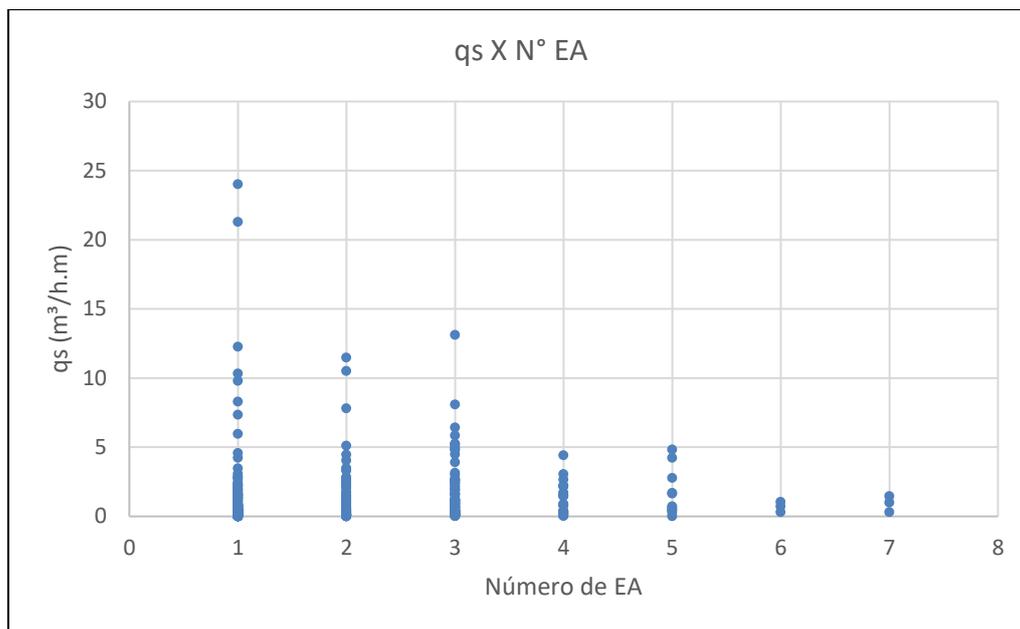
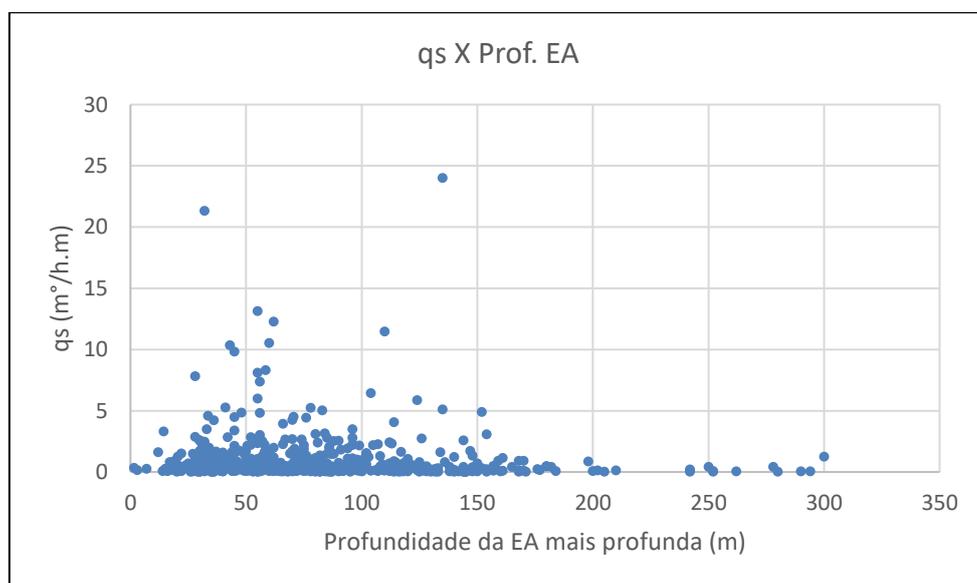


Figura 65 - Relação entre a capacidades específicas e a profundidade das EA.



Apesar de possuir casos com elevados valores de capacidade específica, que chegam a até 24 m³/h.m, a grande maioria dos poços apresentam baixas produtividades, menores que 1,06 m³/h.m. Já para as vazões, observou-se majoritariamente valores superiores a 4 m³/h, que em muitos casos é o suficiente para suprir as demandas dos pequenos consumidores da região.

As grandes variações observadas para as características hidrogeológicas do SASG reflete bem o alto grau de anisotropia que este sistema aquífero possui. Apesar disso, verificou-se uma relação intrínseca com as estruturas identificadas para a região, em especial com as de maior porte.

5.3.3.2. Caracterização hidrogeológica do SAG

Na avaliação da potenciometria do SAG levou-se em consideração dois conjuntos de dados, um referente a 23 poços, onde as informações presentes nos relatórios mostram que não existe contribuição de água das fraturas das rochas vulcânicas no interior do poço, e outro com 16 poços a mais, onde esta situação de contribuição ocorre, ou não pode ser confirmada. Dessa forma, obteve-se dois mapas potenciométricos para o SAG (Figuras 66 e 67).

A comparação regional entre os dois mapas demonstra grande similaridade entre eles, o que sugere que a contribuição de água das rochas vulcânicas no interior do poço após a perfuração, caso esteja ocorrendo, não é suficientemente grande para alterar as características regionais da potenciometria. Desse modo, na continuidade do estudo foi utilizado apenas o mapa com o maior conjunto de dados, apresentado na Figura 67.

Vale destacar que algumas discrepâncias observadas na variação da potenciometria tem relação com o fato de os dados estarem interpolados, e que não existem poços distribuídos de forma uniforme em toda a região. Um exemplo disso é a área onde se localiza o poço com potenciometria de -16,88 m.s.n.m., que apesar de parecer que todo o fluxo segue para aquele único ponto, apenas mostra um fluxo dos altos potenciométricos para aquele vale. Mesmo que não seja possível ter todos os detalhes das variações da potenciometria, o mapa proposto consegue representar bem os altos e baixos potenciométricos existentes na área, bem como as principais direções do fluxo.

Com relação a potenciometria do SAG, temos um decréscimo acentuado das cotas potenciométricas em direção aos grandes vales da região, como o do Rio da Prata, do Rio das Antas, do Rio Caí e do Rio Paranhana. Esse fluxo é proveniente de quatro células de fluxo principais, com origens nas porções nordeste, noroeste, oeste e sul.

Figura 66 - Mapa potenciométrico do SAG, sem contribuição das fraturas.

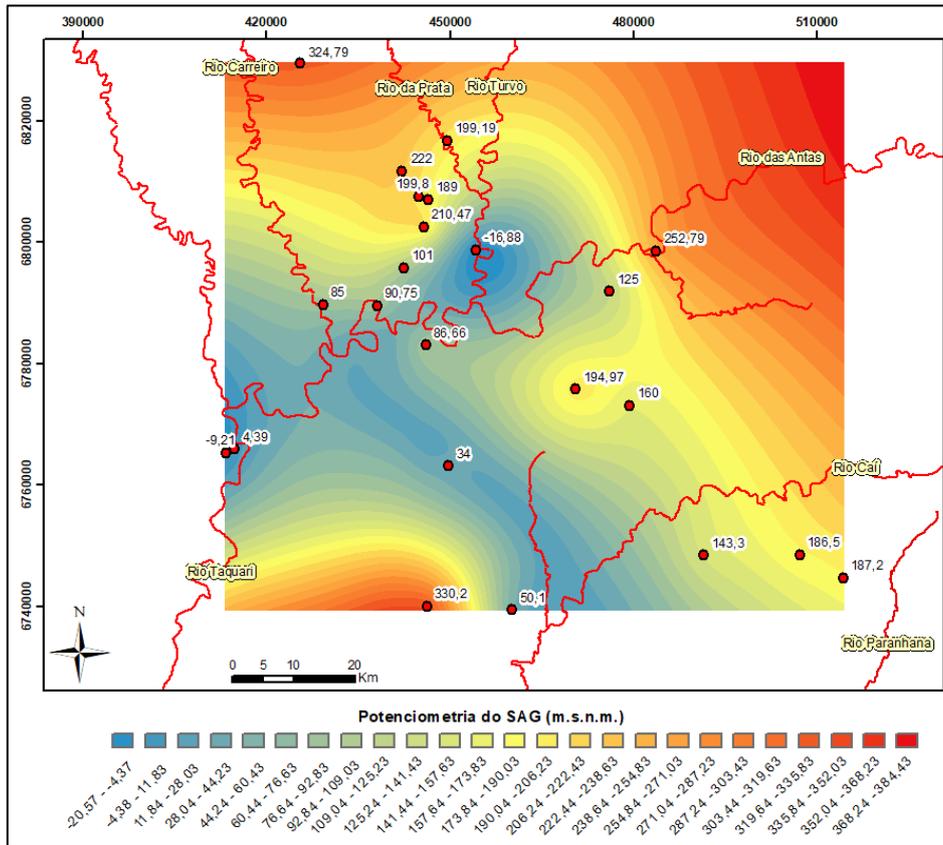
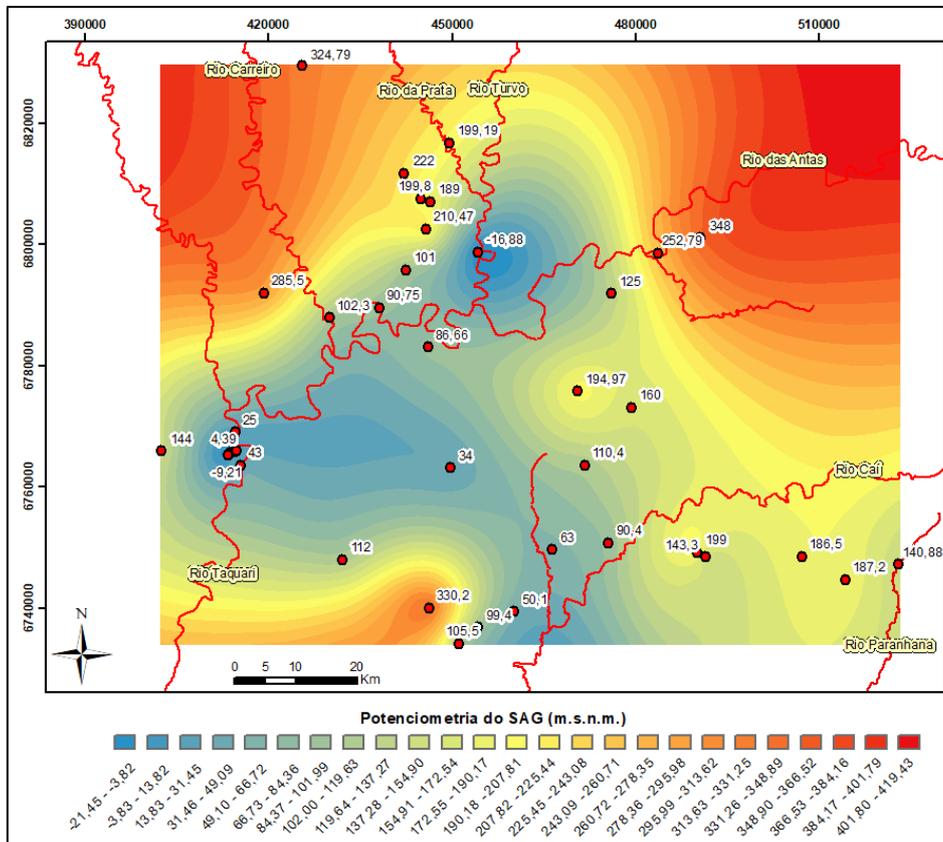


Figura 67 - Mapa potenciométrico do SAG, com possibilidade de contribuição.



Essas direções de fluxo observadas condizem, de maneira geral, com as avaliações feitas por outros autores, como Araújo et al. (1999), Machado (2005a) e Giardin e Faccini (2010), com o fluxo noroeste e nordeste tendo origem nas zonas de recarga no estado de Santa Catarina, além da presença de potenciometrias elevadas na borda sul. A diferença ocorre com relação ao fluxo proveniente da porção oeste, em direção ao Vale do Rio Taquari. A potenciometria mais elevadas nessa área pode ter relação com o maior grau de confinamento do SAG, o que também foi verificado em outras áreas, como no noroeste e nordeste da área de estudo.

Vale ressaltar que na borda sul, a potenciometria possui uma grande relação com o posicionamento do topo do SAG, com os altos potenciométricos coincidindo com os locais onde o topo se encontra mais elevado, apresentando decréscimo em direção aos vales, em um processo similar ao verificado para a Área da Escarpa. Dessa forma, há um fluxo de água seguindo desses locais em direção aos vales próximos, e ao centro da área de estudo.

Chama a atenção também o fato de que a potenciometria do SAG nos poços próximos ao Rio das Antas, Rio Carreiro e Rio Taquari, apresentaram valores equivalentes aos dos níveis de águas desses rios, o que sugere que estes rios podem estar funcionando como zonas de descarga do aquífero. Por outro lado, isso não ocorre em outros locais, como no Rio Turvo e no Rio da Prata, onde a potenciometria está posicionada muito abaixo do nível desses rios.

A capacidade específica nos poços do SAG varia de 0,17 m³/h.m à 4,77 m³/h.m, com média de 1,26 m³/h.m, e mediana de 0,75 m³/h.m. Verificou-se que, em geral, as capacidades específicas na região são baixas, com os maiores valores, acima do terceiro quartil (2,10 m³/h.m), encontrados no município de Vila Flores, e nos vales do Rio Taquari e do Rio das Antas (Figura 68).

Apesar do número limitado de informações, a distribuição e os valores encontrados para a capacidade específica demonstram que a localização não se apresenta como um fator preponderante para produtividade do aquífero, que possui dependência de outros fatores, como espessura da camada de rocha do reservatório, profundidade de penetração do poço no aquífero e grau de confinamento.

Por outro lado, as vazões apresentaram valores expressivos, variando entre 2,53 m³/h e 48,65 m³/h, com média de 17,24 m³/h. Valores acima do terceiro quartil (22,64 m³/h) foram observados no Vale do Rio Taquari (Figura 69).

Esses valores de vazões encontrados mostram a grande importância que o SAG tem para a região, visto que este sistema aquífero é geralmente explorado por empresas que demandam um volume elevado de água, que consegue ser suprido por ele.

Figura 68 - Mapa de distribuição das capacidades específicas (qs) do SAG, em m³/h.m.

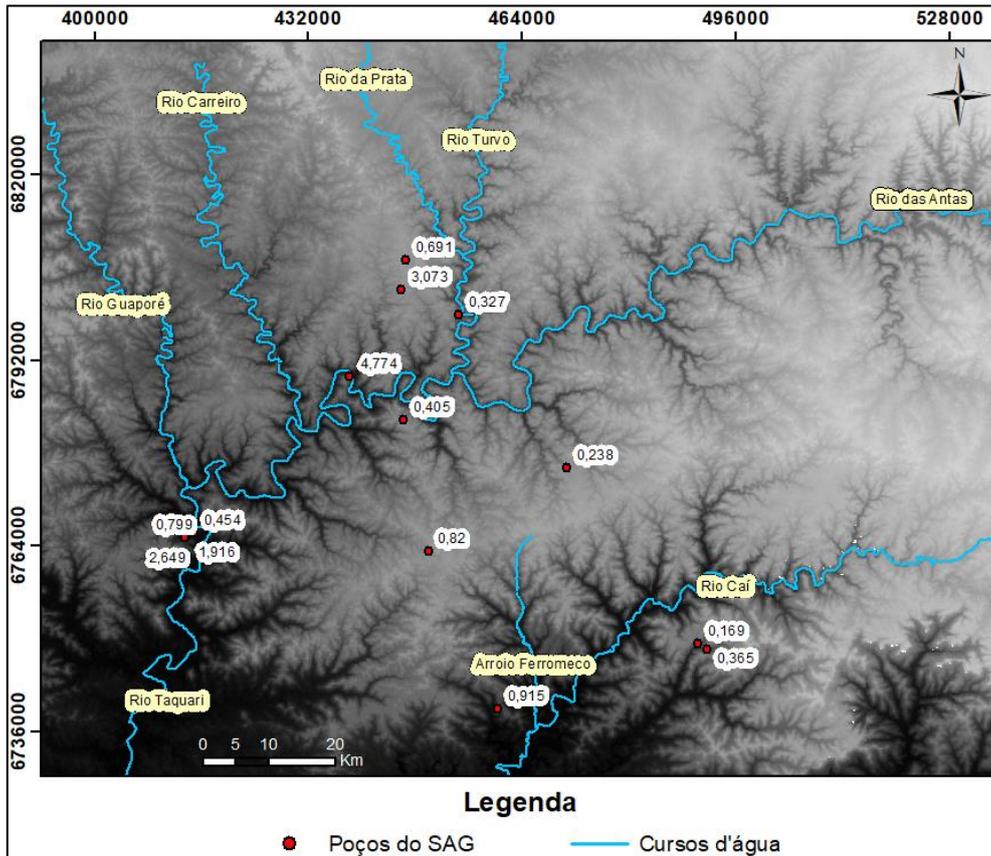
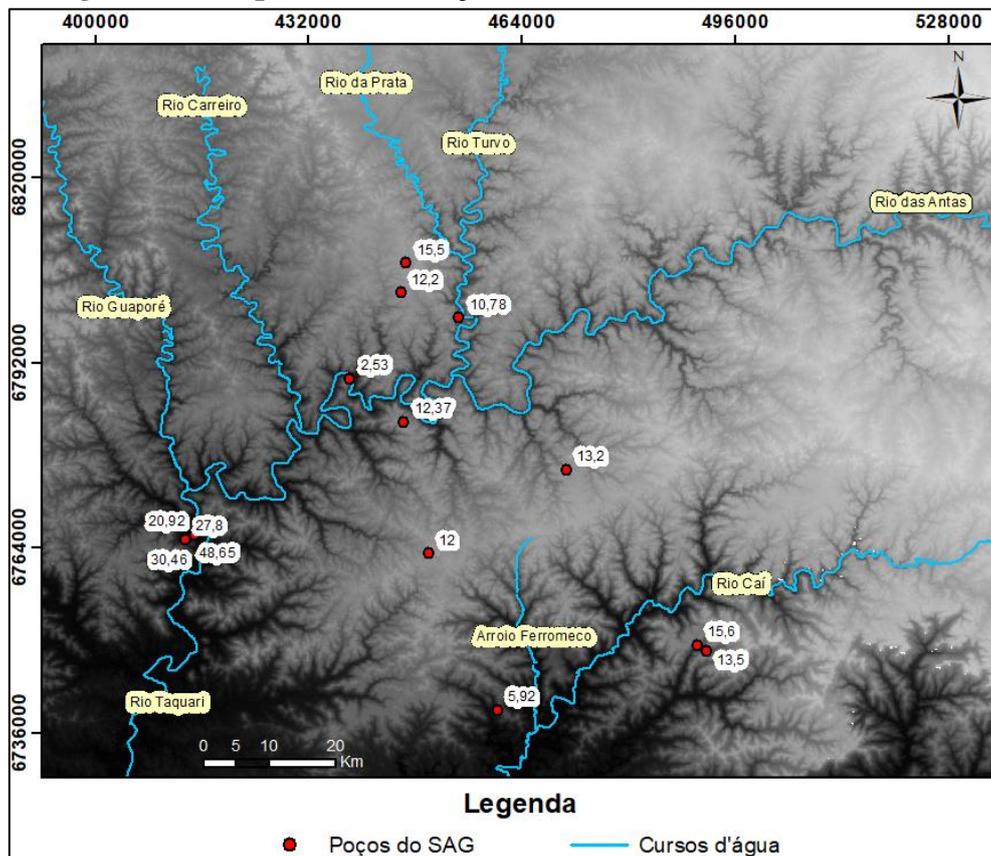


Figura 69 - Mapa de distribuição das vazões (Q) do SAG, em m³/h.

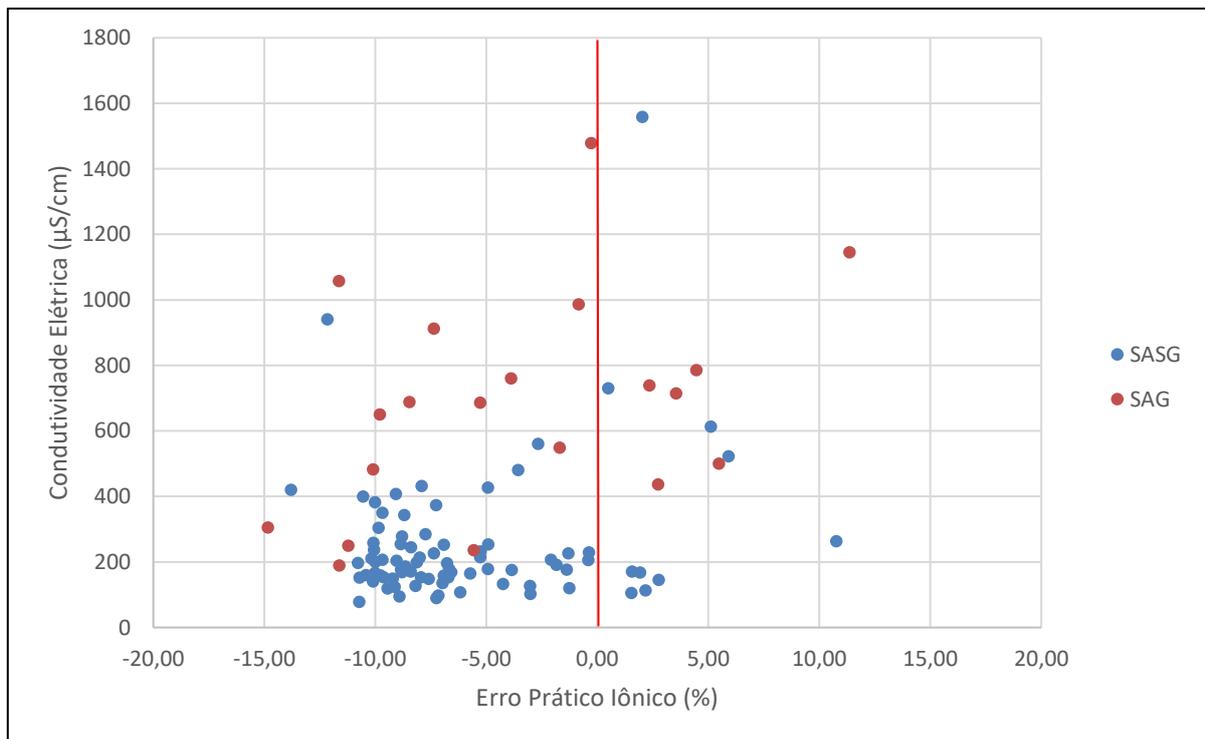


5.3.4. Caracterização hidroquímica e isotópica do SAG e do SASG

Nesta seção serão apresentadas as principais características hidroquímicas e isotópicas para cada um dos sistemas aquíferos separadamente. As informações físico-químicas foram a base para o agrupamento dos poços, de modo a representar as individualidades de cada conjunto. Vale destacar que para esta análise foram utilizados apenas os poços que possuem dados físico-químicos completos, que correspondem a apenas uma parcela dos poços totais desses sistemas aquíferos.

A avaliação do balanço iônico das 83 amostras do SASG e 20 do SAG, mostra que os erros práticos encontrados foram majoritariamente menores que 10%, e nunca superiores a 15% (Figura 70).

Figura 70 - Relação entre o Erro Prático Iônico e a condutividade elétrica.



5.3.4.1. Hidroquímica do SAG

As águas do SAG foram classificadas em três grandes grupos hidroquímicos, o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (4 casos), o das bicarbonatadas sódicas (1 caso), o das sulfatada ou cloretada cálcica ou magnesiana (1 caso) e o das sulfatadas ou cloretadas sódicas (14 casos) (Figuras 71 e 72).

Figura 71 - Diagrama de Piper para as águas do SAG.

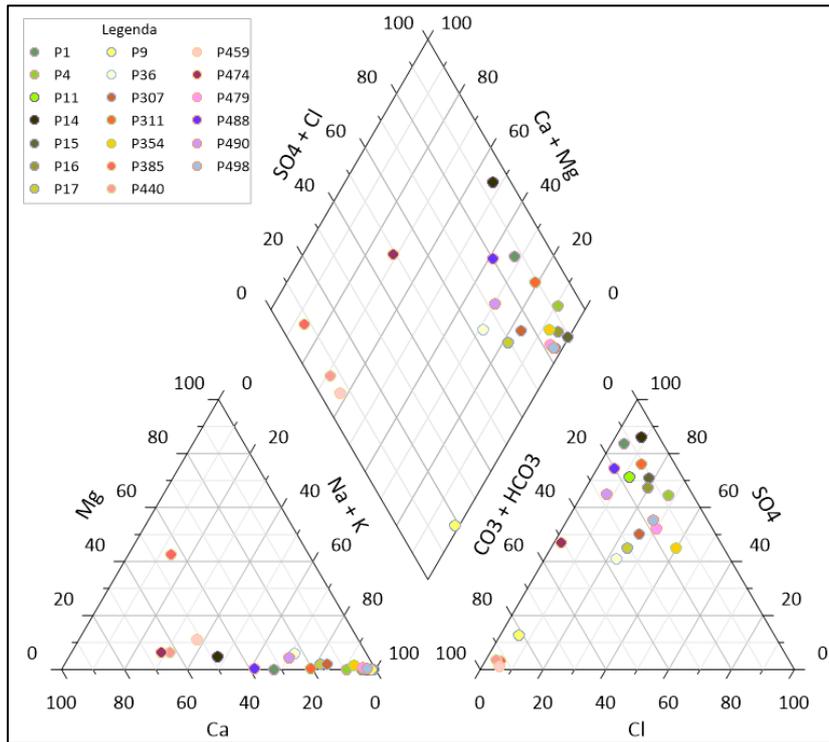
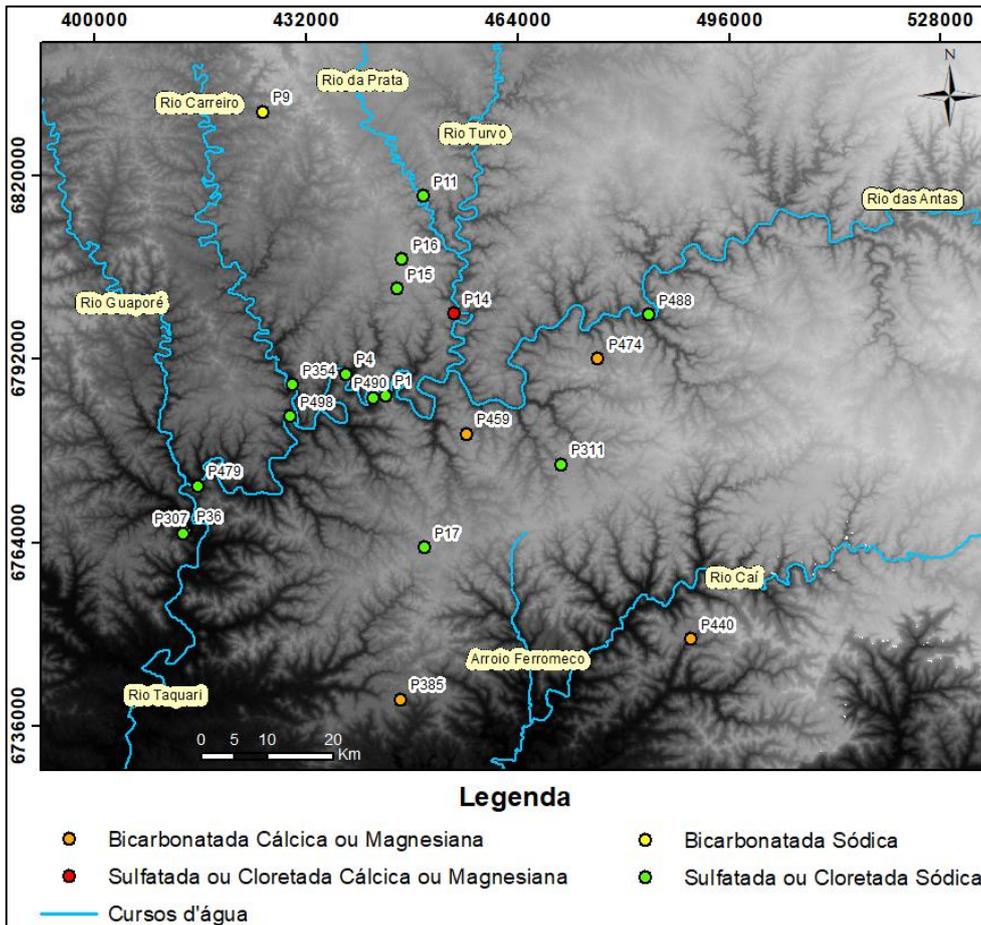


Figura 72 - Distribuição dos grupos hidroquímicos do SAG.



No grupo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas temos que em 3 casos o cátion predominante foi o cálcio, com a formação de águas bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO₃), enquanto no outro caso houve a formação de água do tipo Ca-Mg-HCO₃. Já no grupo das águas sulfatada ou cloretada cálcica ou magnesiana foi encontrada água do tipo Ca-Na-SO₄. O grupo das águas sulfatadas ou cloretadas sódicas tem como principal característica a predominância do ânion sulfato e do cátion sódio, com destaque para as águas sulfatadas sódicas (11 casos). Nos demais casos as águas não apresentaram um cátion predominante, formando águas do tipo Na-SO₄-HCO₃ (2 casos) e Na-SO₄-Cl (1 caso).

Os poços do SAG com águas bicarbonatadas cálcicas estão relacionados com o fluxo de água a partir das fraturas das rochas vulcânicas, estando estes poços localizados principalmente na área ao sul, próximo das escarpas. Com o aumento do grau de confinamento, bem como um distanciamento das zonas de recarga, localizadas ao sul da área de estudo, há uma evolução dessas águas, com o aparecimento de outros grupos, em especial o das águas sulfatadas ou cloretadas sódicas. Esse processo reflete o que já foi observado por outros autores como Silva (1983), Hindi (2007) e Reginato et al. (2013) para a hidroquímica do SAG na Bacia do Paraná.

A presença de concentrações elevadas de sódio, cloreto, fluoreto e sulfato podem ter relação com aquíferos sotopostos ao SAG (pré-SAG). Para Gastmans (2007), o incremento no SAG de concentrações de cloreto e sulfato mostram uma influência de águas provenientes do pré-SAG. Já para Teixeira e Viero (2017), a Formação Irati surge como uma provável fonte para as concentrações elevadas desses elementos.

Utilizando a metodologia proposta pela Análise dos Componentes Principais (ACP), verificou-se que apenas duas novas componentes são responsáveis por explicar 72,61% da variabilidade de todo o conjunto de dados referentes às águas dos SAG (Tabela 11).

Tabela 11 - Variância Total Explicada das águas do SAG.

Componentes	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	4,64	57,97	57,97	4,64	57,97	57,97
2	1,17	14,65	72,61	1,17	14,65	72,61
3	0,86	10,68	83,30			
4	0,62	7,71	91,00			
5	0,38	4,68	95,68			
6	0,22	2,79	98,47			
7	0,10	1,20	99,67			
8	0,03	0,33	100,00			

Na avaliação individual das componentes temos que a componente 1 possui uma forte relação positiva com o sódio, cloreto, fluoreto, sulfato e condutividade elétrica. Já a componente 2 está relacionada principalmente com o cálcio, e secundariamente com o sulfato (Tabela 12).

Tabela 12. Matriz dos Componentes das águas do SAG.

	Componente	
	1	2
Ca	-0,447	0,74
Mg	-0,655	-0,153
Na	0,91	-0,148
HCO ₃	-0,545	-0,45
CE	0,92	0,065
Cl	0,766	-0,338
F	0,875	-0,104
SO ₄	0,827	0,497

Com base no método de Agrupamento Cluster Hierárquico, os poços foram agrupados em função das suas principais características físico-químicas. Dessa forma, verificou-se a formação de quatro grupos que possuem características distintas entre si, denominados de C1-SAG, C2-SAG, C3-SAG e C4-SAG (Figuras 73 e 74).

Figura 73 - Dendrograma de agrupamento dos poços do SAG.

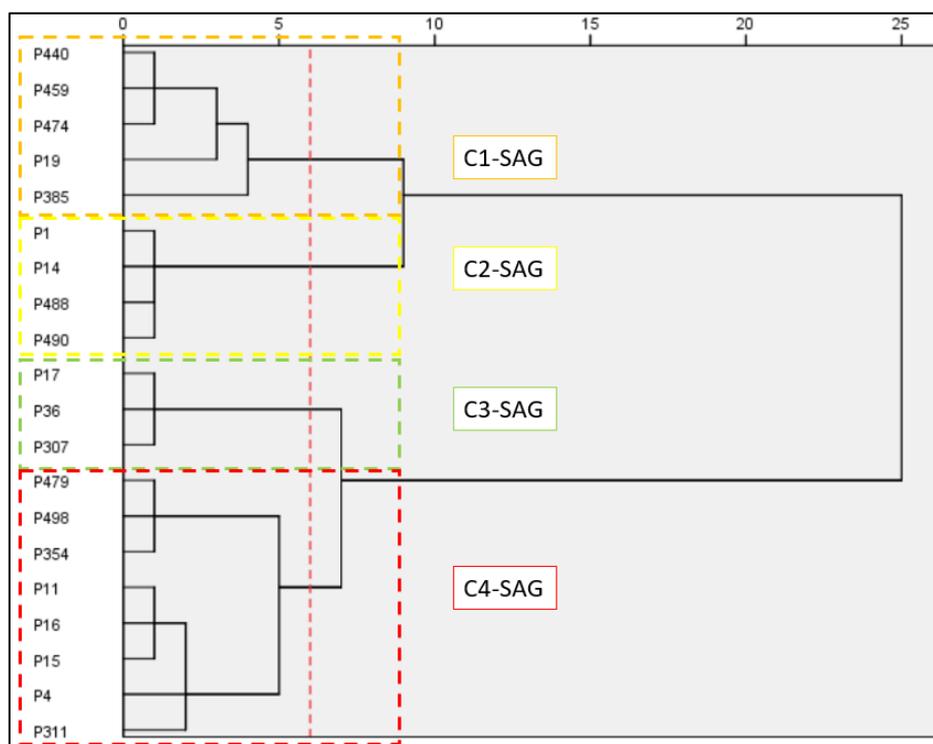
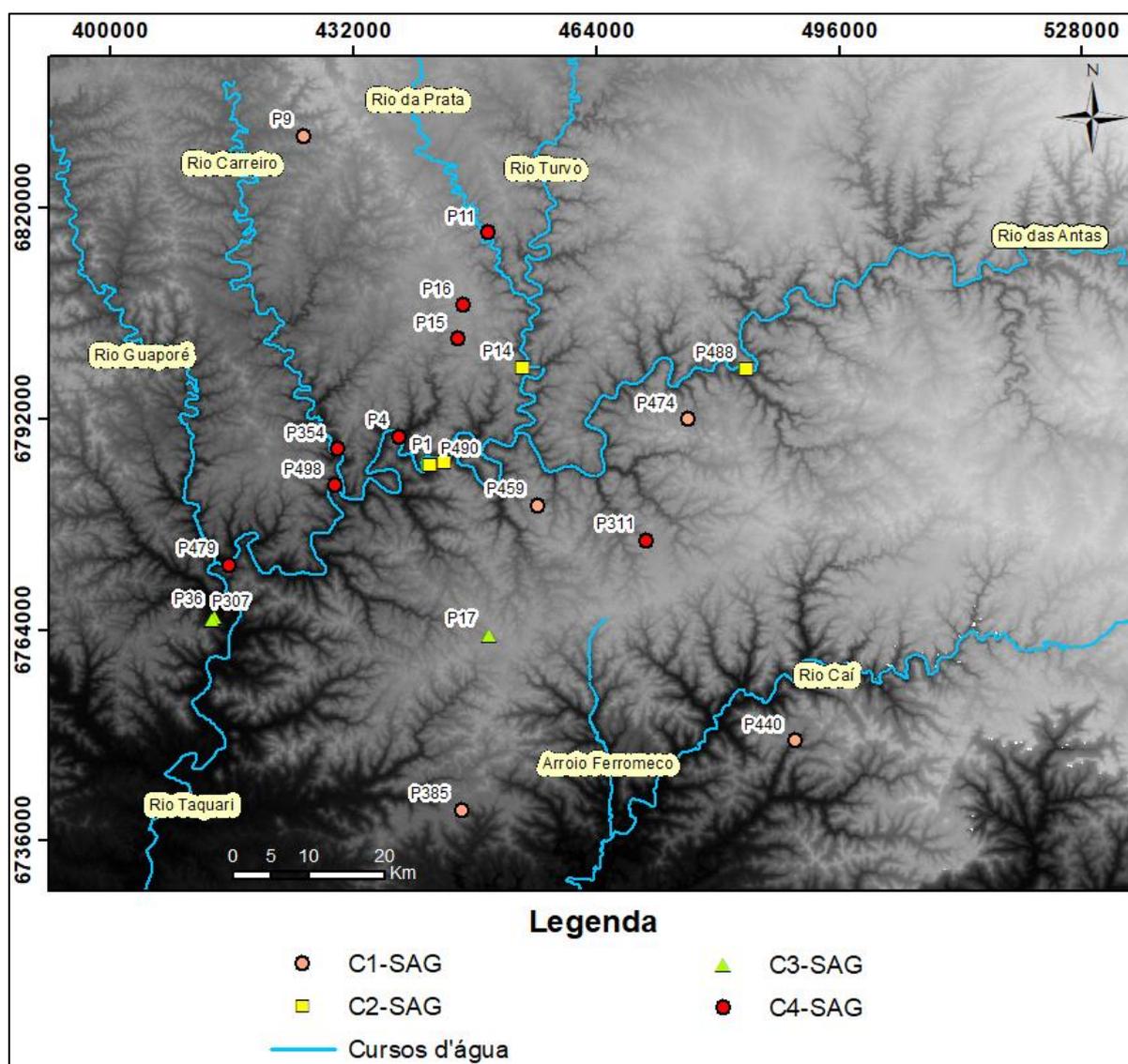


Figura 74 - Distribuição dos agrupamentos hidroquímicos do SAG.



O grupo C1-SAG é composto por poços que possuem valores altos de bicarbonato, e baixos de fluoreto, cloreto, sulfato, sódio e condutividade elétrica. A exceção ocorre no poço P474, que possui concentração de sulfato mais elevada, mas que foi enquadrada nesse grupo devido a sua grande similaridade com os demais parâmetros típicos desse grupo. As águas foram classificadas em dois grandes grupos hidroquímicos, o das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (4) e o das bicarbonatadas sódicas (1). Esse grupo é composto por dois poços localizados nas áreas próximas das escarpas, com pequeno confinamento e o topo do SAG em cotas bem elevadas. Além destes, temos três poços com grande confinamento, um localizado no município de Pinto Bandeira, que possui contribuição das entradas de águas das rochas vulcânicas no interior do poço, e os outros dois nos municípios de Nova Araçá e Flores da Cunha.

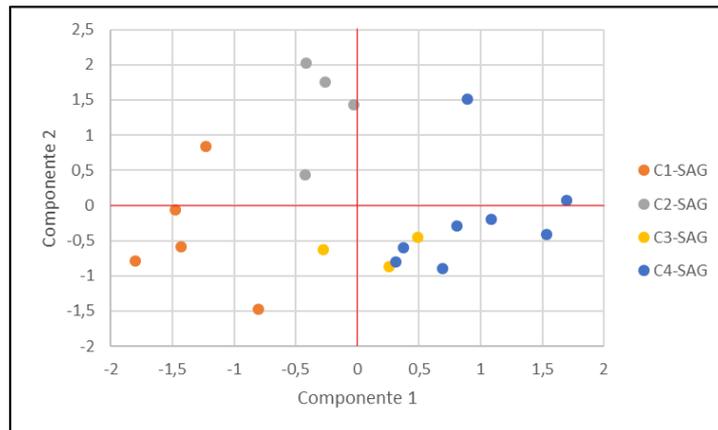
O grupo C2-SAG é composto por poços que possuem águas com uma alta concentração de sulfato e baixa de cloreto. Além disso, apresenta concentrações mais elevadas de cálcio, em geral, acima do terceiro quartil. As águas desse grupo foram classificadas como sulfatadas sódicas (3) e sulfatada ou cloretada cálcica ou magnésiana (Ca-Na-SO₄). Os poços estão localizados nos vales do Rio das Antas e do Rio da Prata, onde as espessuras das rochas vulcânicas são menores.

O grupo C3-SAG é composto por poços que possuem águas típicas do SAG de alto confinamento, com valores elevados de condutividade elétrica, sódio, cloreto e sulfato. Porém, chama atenção os valores elevados de bicarbonato, apesar das baixas concentrações de cálcio e magnésio. Além disso, o fluoreto encontrado é maior que 1 mg/l. Por conta desses valores mais elevados de bicarbonato, temos a formação de águas do tipo Na-SO₄-HCO₃ em dois poços, e água sulfatada sódica no outro. São poços que possuem diferentes características físicas, sendo dois deles localizados no Vale do Rio Taquari, no município de Encantado, e o outro na cidade de Garibaldi, onde a cota do terreno é 614 m.s.n.m., com um confinamento de 642 m.

O grupo C4-SAG é composto, assim como o grupo anterior, por poços que possuem águas típicas do SAG de alto confinamento, com valores elevados de sódio, sulfato, cloreto e condutividade elétrica, mas com concentrações bicarbonato bem mais baixas que as encontradas em C3-SAG. Com exceção do poço P354, onde a concentração de fluoreto foi de 0,5 mg/l, em todos os outros essa concentração foi maior que o Valor Máximo Permitido (VMP), de 1,5 mg/l, definido pela Portaria Consolidada n° 5 do Ministério da Saúde (Brasil, 2017), chegando a até 2,8 mg/l. Além disso, o poço P354 é o único com as águas do tipo Na-SO₄-Cl, enquanto os demais possuem águas sulfatadas sódicas. Os poços desse grupo estão distribuídos em 3 regiões diferentes, sendo uma delas na área mais ao norte, nos municípios de Veranópolis, Vila Flores e Nova Prata, que possuem um confinamento superior à 600 m. O outro conjunto, composto por quatro poços, está localizado nos vales do Rio das Antas e do Rio Carreiro, e por esse motivo possuem um confinamento menor gerado pelas rochas vulcânicas, abaixo dos 330 m. A outra área, onde se localiza o poço P311, possui características similares ao da região mais ao norte, estando posicionado em uma região mais elevada topograficamente e com alto grau de confinamento.

Ao integrar os dois modelos, o ACP e o Agrupamento Cluster Hierárquico, temos que o agrupamento pelos scores das componentes mostra uma separação entre os grupos C1-SAG e C2-SAG, com os grupos C3-SAG e C4-SAG ocupando uma mesma faixa (Figura 75).

Figura 75 - Relação entre os grupos de águas do SAG e os scores para as duas componentes principais



Os grupos C1-SAG e C2-SAG refletem bem as fracas relações com as componente 1, principalmente por conta das baixas concentrações de cloreto e o fluoreto. Além disso, o grupo C1-SAG, que possui baixas concentrações de sulfato, também apresenta scores negativos para a componente 2.

Os grupos C3-SAG e C4-SAG apresentam uma relação positiva com a componente 1 e negativa com a componente 2, o que demonstra bem suas características, com uma forte relação com o sódio, o fluoreto, o cloreto, o sulfato e a condutividade elétrica. O ponto isolado de C4-SAG, com valores positivos para a componente 2 corresponde ao poço que possui uma concentração mais elevada de cálcio.

A temperatura da água dos poços do SAG se mostrou um parâmetro mais relacionado com o grau de confinamento do que com os grupos de águas (Figura 76 e 77). A temperatura variou entre 18,6°C e 40,3°C, com os valores mais elevados, superiores a 36°C, sendo encontrados em poços onde a cobertura das rochas vulcânicas são maiores que 570 m.

Figura 76 - Relação entre o grau de confinamento e a temperatura das águas do SAG.

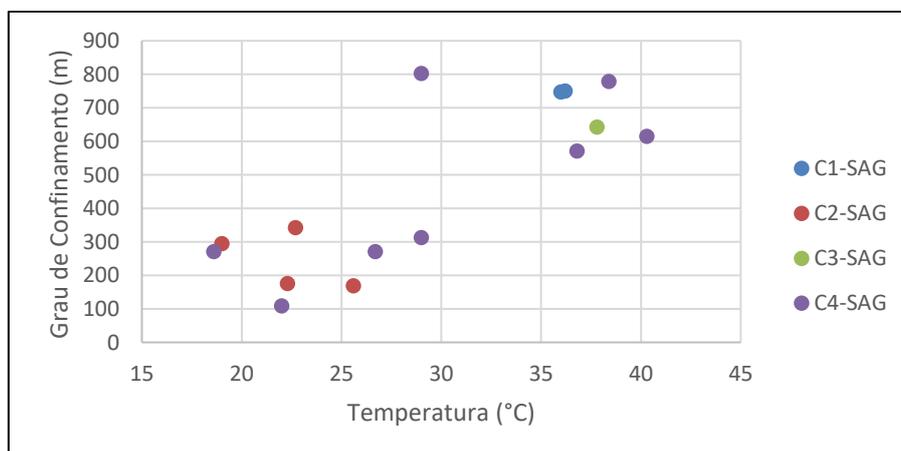
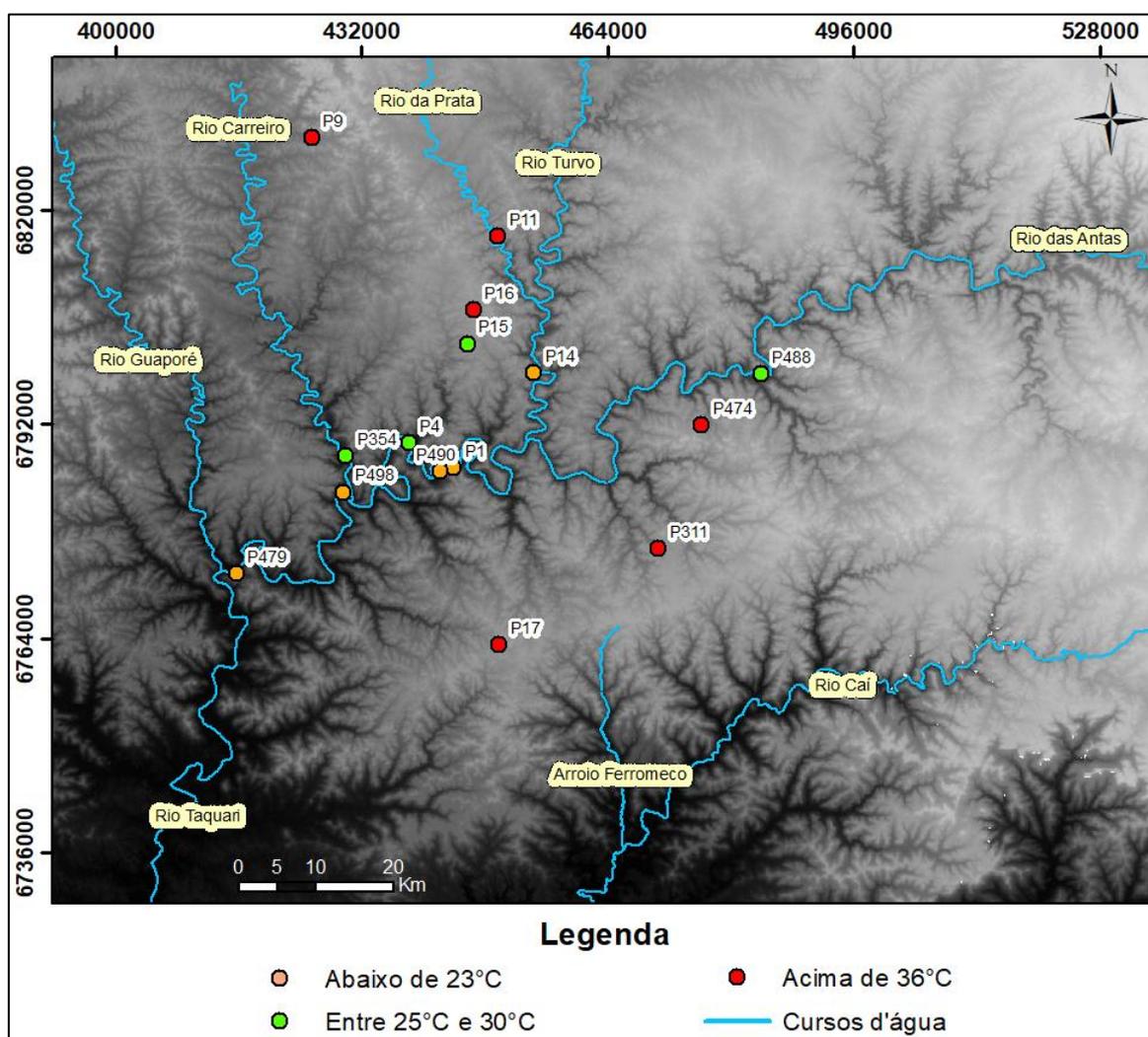


Figura 77 - Distribuição das temperaturas das águas dos poços do SAG.

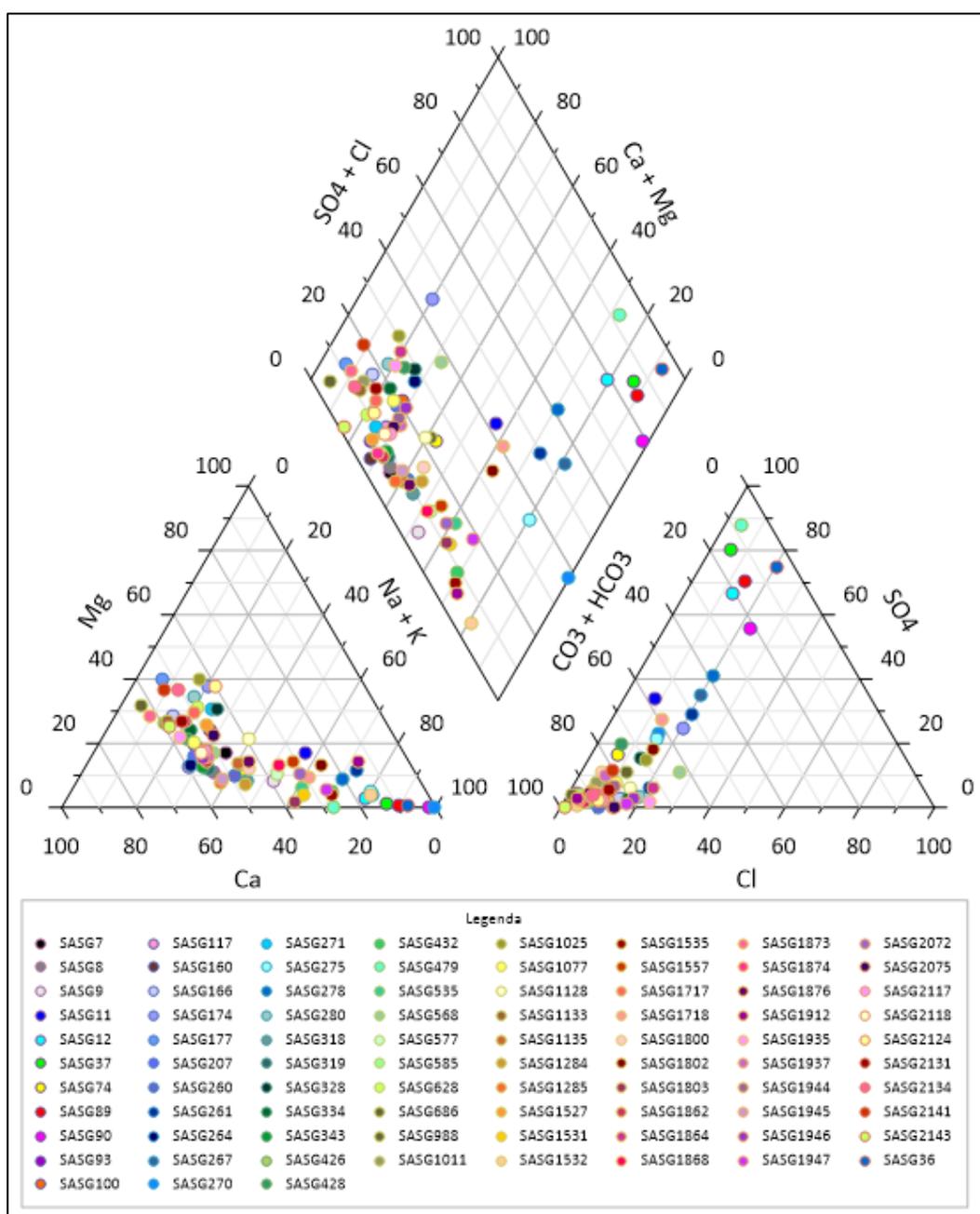


Todo esse conjunto de informações demonstra que as águas do SAG na Área do Planalto possuem como característica principal os valores elevados de sódio, sulfato e condutividade elétrica, além de concentrações mais altas de fluoreto e cloreto, que podem ter influência de águas provenientes do pré-SAG. Desse modo, esses parâmetros surgem como os principais traçadores na avaliação de interação das águas do SAG nos poços perfurados apenas nas rochas vulcânicas, com um destaque maior para os três primeiros parâmetros citados.

5.3.4.2. Hidroquímica do SASG

As águas do SASG foram classificadas em três grandes grupos hidroquímicos, o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (56 casos), o das bicarbonatadas sódicas (19 casos) e o das sulfatadas ou cloretadas sódicas (7 casos) (Figuras 78 e 79).

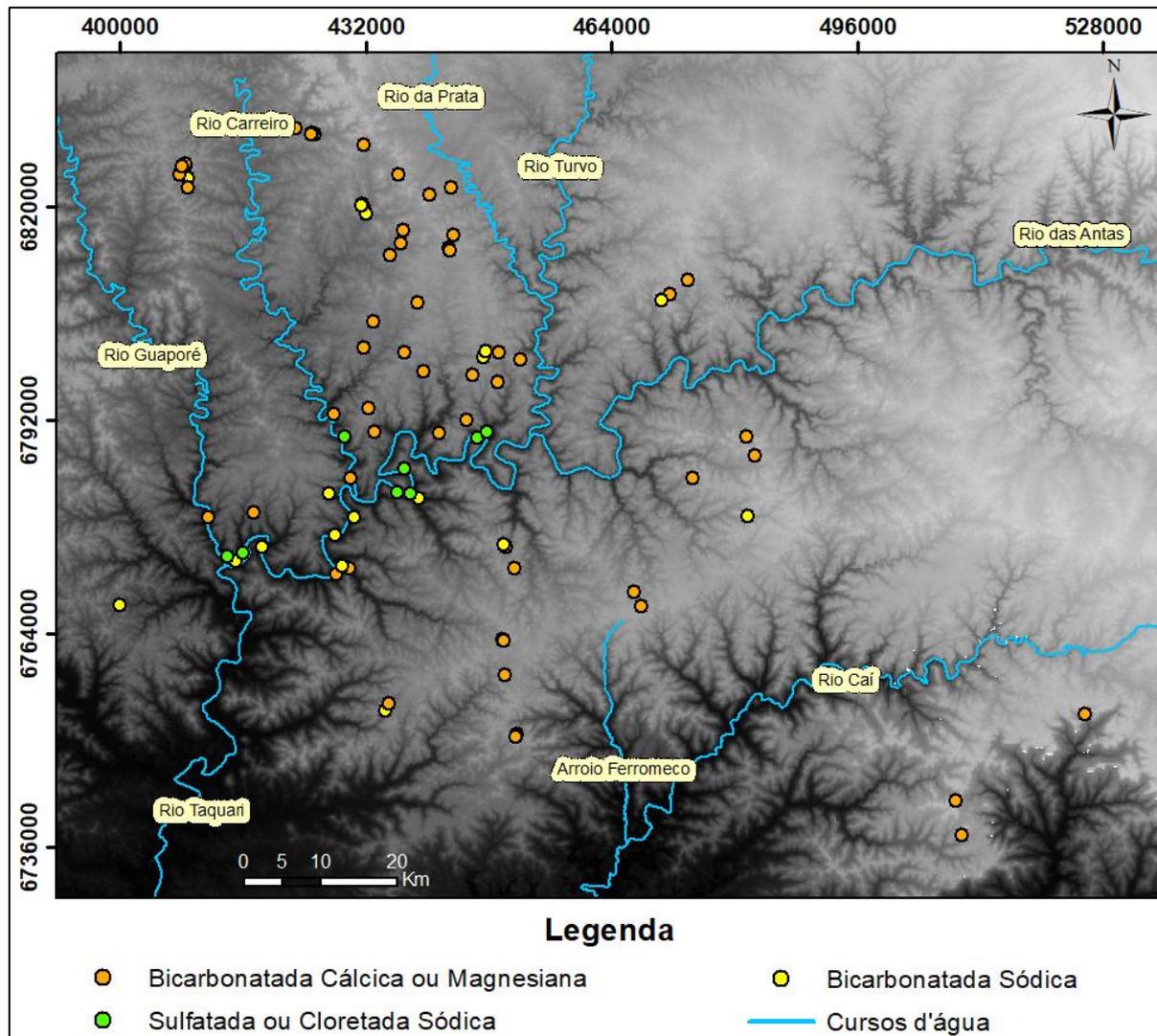
Figura 78 - Diagrama de Piper para as águas do SASG.



Dentro do grupo das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas temos que em 35 casos o cátion predominante foi o cálcio, com a formação de águas bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO₃). Nos outros 21 casos tivemos a formação de águas onde nenhum dos cátions se sobressaiu sobre os demais, com águas Ca-Mg-HCO₃ (9), Ca-Na-HCO₃ (8), Ca-Na-Mg-HCO₃ (2) e Na-Ca-HCO₃ (2). No grupo das águas sulfatadas ou cloretadas sódicas temos que para todas as amostras o cátion principal é o sódio, onde se destacam as águas sulfatadas sódicas, que ocorrem em 5 poços. Além disso, em 2 poços foram verificadas águas dos tipos Na-SO₄-HCO₃ e Na-HCO₃-SO₄. Com relação as águas bicarbonatadas sódicas é importante ressaltar

que, apesar do sódio se sobressair sobre o cálcio e o magnésio, existe uma diferenciação entre as águas, com casos onde as concentrações de sódio são muito elevadas, enquanto em outros os valores são baixos.

Figura 79 - Distribuição dos grupos hidroquímicos do SASG.



Os poços com águas do grupo hidroquímico das bicarbonatadas cálcicas ou magnésianas foram observados quase que exclusivamente nas áreas mais elevadas topograficamente, distante dos grandes vales. Por outro lado, as águas sulfatadas ou cloretadas sódicas foram encontradas nas áreas próximas do Rio das Antas e do Rio Carreiro. Já as bicarbonatadas sódicas se distribuem ao longo da área de estudo, tanto nas áreas mais elevadas, quanto nos vales.

Essas informações mostram a existência de dois grupos hidroquímicos distintos, o das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnésianas, que segundo Lisboa (1996), Bittencourt et al.

(2003) e Machado (2005a) são as águas típicas do SASG, e o das águas sulfatadas ou cloretadas sódicas, que para autores como Athayde et al. (2007), Manasses et al. (2007), Nanni (2008) e Teixeira e Viero (2017) possuem elementos com concentrações que dificilmente seriam originárias desse aquífero. Segundo esses autores, as águas bicarbonatadas sódicas também poderiam se enquadrar nessa última situação, porém, os teores de sódio poderiam ter origem em fontes antrópicas, como sugerido por Bongioio et al. (2011), ou ter relação com a presença de fraturas produtoras mais profundas, como indicado por Ferreira et al. (2005) e Portela Filho et al. (2005), devendo dessa forma ser analisado caso a caso.

Com base na Análise dos Componentes Principais (ACP) verificou-se que apenas duas novas componentes são responsáveis por explicar 81,68% da variabilidade de todo o conjunto de dados referentes às águas dos SASG (Tabela 13).

Tabela 13. Variância Total Explicada das águas do SASG.

Componentes	Total	% de variância	% cumulativa	Total	% de variância	% cumulativa
1	4,148	51,85	51,85	4,148	51,85	51,85
2	2,386	29,83	81,68	2,386	29,83	81,68
3	0,647	8,085	89,761			
4	0,421	5,268	95,028			
5	0,231	2,892	97,921			
6	0,134	1,679	99,6			
7	0,018	0,23	99,83			
8	0,014	0,17	100			

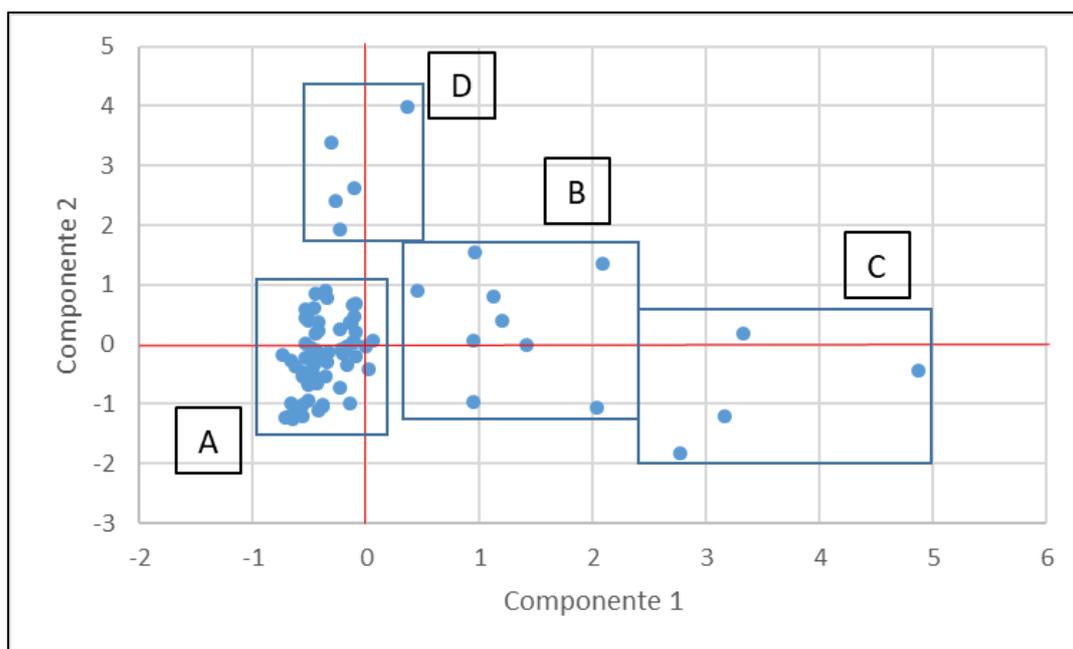
Na avaliação da matriz das componentes temos que a componente 1 possui uma forte relação com o sódio, cloreto, fluoreto, sulfato e condutividade elétrica. Já a componente 2 está relacionada com o bicarbonato, o cálcio e o magnésio (Tabela 14).

Tabela 14. Matriz dos Componentes das águas do SASG.

	Componente	
	1	2
Ca	0,003	0,858
Mg	-0,158	0,884
Na	0,963	-0,051
HCO ₃	0,085	0,837
CE	0,959	0,236
Cl	0,822	0,219
F	0,833	-0,228
SO ₄	0,947	-0,107

Avaliando os escores para as duas componentes principais, verificou-se que as águas se agrupam em 4 conjuntos de poços (A, B, C e D). O conjunto A, que contempla a maior quantidade de poços, possui uma relação negativa com a componente 1 e uma relação com a componente 2 que varia de negativa à positiva. O conjunto B também apresenta uma relação com a componente 2 que varia entre escores positivos e negativos, porém, apresenta uma relação positiva com a componente 1. Os outros dois conjuntos são mais bem definidos, com um deles (C) apresentando forte relação com a componente 1 e fraca com a componente 2, enquanto o outro (D) possui uma característica exatamente oposta, com forte relação a componente 2 e fraca com a componente 1 (Figura 80).

Figura 80 - Gráfico representativo dos escores das duas componentes principais.

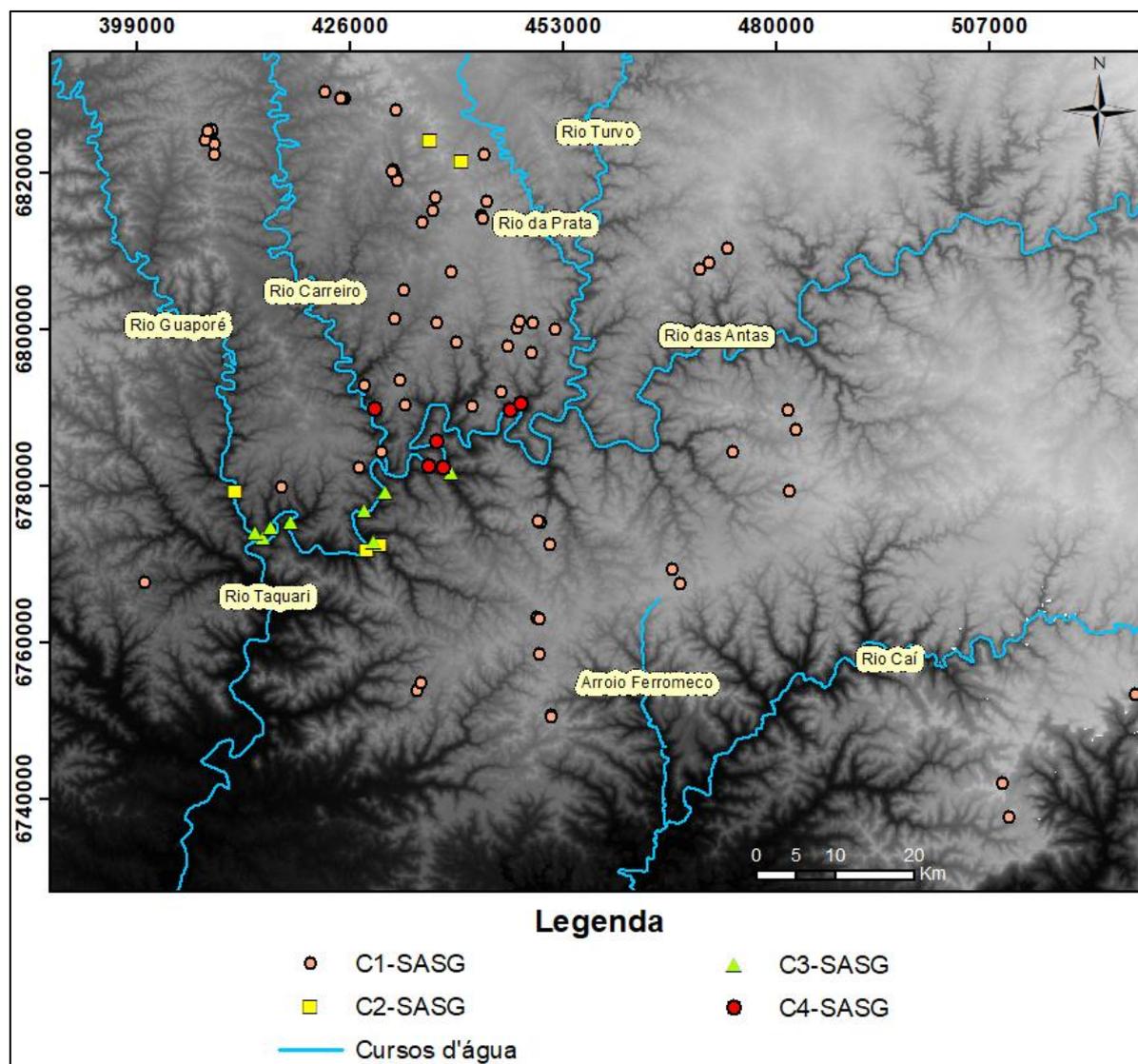


Com a aplicação do método de Agrupamento Cluster Hierárquico verificou-se que os poços se agruparam em 4 grupos, denominados de C1-SASG, C2-SASG, C3-SASG e C4-SASG, e que possuem características distintas entre si (Figuras 81 e 82).

O grupo C1-SASG é composto por poços que apresentam águas caracterizadas pela baixa concentração de sulfato e condutividades elétricas que não ultrapassam 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O principal constituinte dessas águas é o bicarbonato, com baixas concentrações de cálcio, sódio e magnésio. As águas foram classificadas em dois grandes grupos hidroquímicos, o das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (51) e o das bicarbonatadas sódicas (13). No grupo das bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas temos majoritariamente águas do tipo Ca-HCO_3

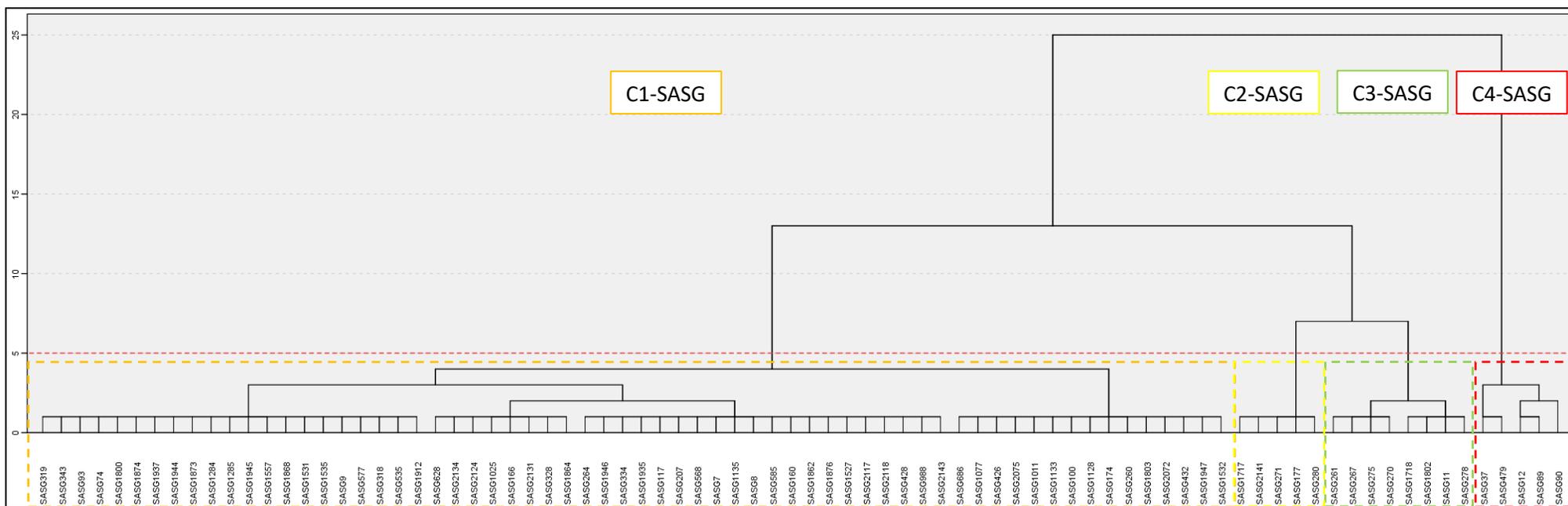
(33), e secundariamente águas do tipo Ca-Mg-HCO_3 (6), Ca-Na-HCO_3 (8), Ca-Na-Mg-HCO_3 (2) e Na-Ca-HCO_3 (2).

Figura 81 - Distribuição dos agrupamentos hidroquímicos do SASG.



O grupo C2-SASG compreende as águas com grande relação com o bicarbonato, o cálcio e o magnésio. Esse grupo se destaca também por apresentar as maiores concentrações de cálcio e magnésio dentre todo o conjunto de poços. Além disso, verificou-se as menores concentrações de sulfato, fluoreto e sódio, e salvo uma exceção, de cloreto também. Outra característica desse grupo é a condutividade elétrica em um patamar mais elevado que o encontrado no grupo C1-SASG, com valores chegando a até $432 \mu\text{S}/\text{cm}$. As águas desse grupo foram todas classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, com destaque para as águas Ca-Mg-HCO_3 (3) nos vales, e Ca-HCO_3 (2) no alto dos morros.

Figura 82 - Dendrograma de agrupamento dos poços do SASG.



No grupo C3-SASG destaca-se um predomínio do cátion sódio sobre o cálcio e o magnésio, com a formação de águas sódicas. Essas águas foram classificadas como pertencentes a dois grupos hidroquímicos, o das bicarbonatadas sódicas (6) e das sulfatadas ou cloretadas sódicas (2). Nos dois casos das águas sulfatadas ou cloretadas sódicas foi observada concentrações similares de bicarbonatos e sulfatos, com a formação de águas Na-SO₄-HCO₃ e Na-HCO₃-SO₄. Vale destacar também que, apesar de na grande maioria dos casos o bicarbonato ser o ânion principal, foram encontrados também valores elevados de sulfato, variando de 32 à 103 mg/l. Além disso, temos que as concentrações de sódio observadas nas águas bicarbonatadas sódicas foram bem mais elevadas que as do grupo C1-SAG.

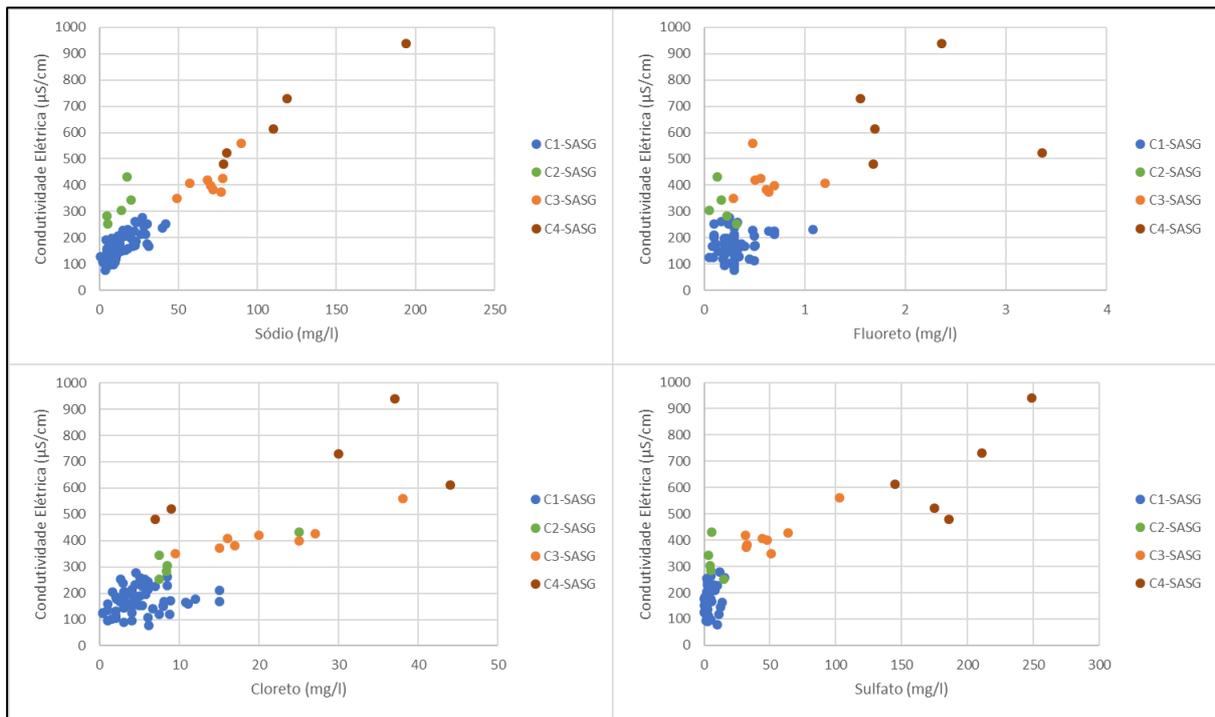
O grupo C4-SASG apresenta água similares às encontradas no SAG na região, com concentrações muito elevadas de sulfato, acima de 145 mg/l, bem como altos valores para a condutividade elétrica, o fluoreto e o sódio. As águas desse grupo foram classificada com sulfatadas ou cloretadas sódicas, do tipo Na-SO₄. Vale destacar a existência de um poço, o S36, que não foi incluído para a formação dos grupos, pelo fato de compor um grupo distinto dos demais, mas que possui características similares à deste grupo. Este poço também possui águas Na-SO₄, mas com valores bem mais elevados de sódio, cloreto, fluoreto, sulfato e condutividade elétrica, e por este motivo foi incluído neste grupo.

Levando em consideração os parâmetros que representam as principais características das águas do SAG na região, o sódio, o sulfato, a condutividade elétrica, o fluoreto e o cloreto, bem como o fato de estes mesmos parâmetros apresentarem uma forte relação com a principal componente indentificada pelo método ACP, foram elaborados diagramas binários para estes elementos, de modo a avaliar o seu comportamento individualizado para cada um dos 4 grupos de águas do SASG (Figura 83)

A relação do sódio com a condutividade elétrica demonstra a importante contribuição que este íon tem para as águas do SASG. Além disso, vale destacar a separação entre os grupos C3 e C4-SASG, que possuem concentrações de sódio maiores que 50 mg/l, dos grupos C1 e C2-SASG.

Quando se leva em consideração o sulfato também se observa uma tendência de aumento das concentrações com o incremento da condutividades. Porém, isso só ocorre para os grupos C3 e C4-SASG, o que indica uma importância muito maior desse íon para as águas desses dois grupos. Nos grupos C1 e C2-SASG as concentrações de sulfato independem da condutividade, apresentando valores inferiores a 15 mg/l, patamar este que corresponde a metade do menor valor observado nas águas dos grupos C3 e C4-SASG.

Figura 83 – Diagramas binários para os parâmetros do SASG.



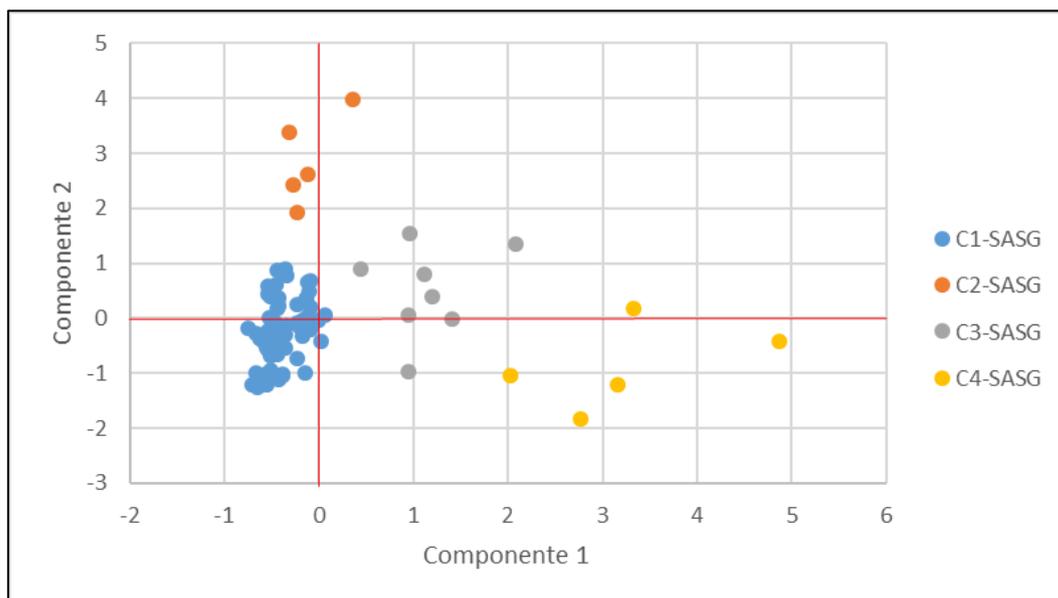
Os outros dois parâmetros analisados não apresentaram uma relação bem definida com a condutividade elétrica, com exceção apenas do cloreto do grupo C3-SASG, que tende a aumentar com a condutividade. Apesar disso, é possível observar que, em geral, as águas com maiores concentrações de cloreto e fluoreto apresentam valores mais elevados de condutividade.

A análise conjunta dos dois modelos, o ACP e o Agrupamento Cluster Hierárquico, mostra que o agrupamento pelos scores das componentes principais inicialmente proposto, coincide quase que completamente com os scores dos 4 grupos (Figura 84).

O grupo C1-SASG possui scores baixos para a componente 1, com águas majoritariamente bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, e com as variabilidades observadas podendo estar relacionadas as características da componente 2. Já o C2-SASG representa bem as suas relações com o bicarbonato, o cálcio e o magnésio, tendo scores altos para a componente 2, e baixos para a componente 1.

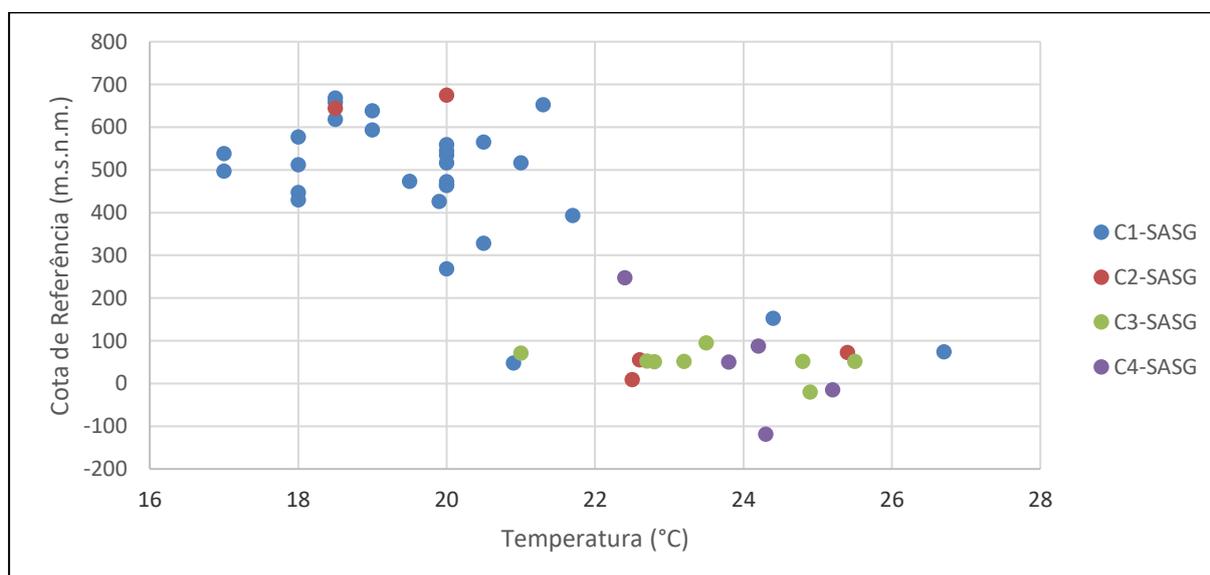
O grupo C3-SASG apresenta uma relação positiva com as duas componentes, o que demonstra bem suas características, como o predomínio do bicarbonato e do sódio, mas com uma presença marcante do sulfato. O grupo C4-SASG possui scores elevados para componente 1, muito por conta dos altos valores encontrados de sódio, fluoreto, cloreto, sulfato e condutividade elétrica.

Figura 84 - Relação entre os grupos de águas do SASG e os scores para as duas componentes principais.



A temperatura das águas do SASG apresentou uma boa relação com a cota de referência (Figura 85). A opção pela cota de referência se deve ao fato de que boa parte dos poços não possuem informações quanto às entradas de água, sendo utilizado nestes casos, como um parâmetro de estimativa, a cota do nível estático. Dessa forma, temos que a temperatura variou entre 17°C e 26,7°C, com os maiores valores situados em cotas abaixo de 150 m.s.n.m. Todos os quatro grupos apresentaram águas com temperaturas mais elevadas, porém vale destacar que em C3-SASG e C4-SASG quase todos os poços apresentaram essa característica.

Figura 85 - Relação entre a cota de referência e a temperatura das águas do SASG.



Vale resaltar que, apesar de existirem temperaturas um pouco mais elevadas, ainda assim elas são consideradas, na maioria dos casos, como águas frias (menor que 25°C), segundo Brasil (1945). Além disso, os estudos que consideraram esse parâmetro como um indicio de influência de águas de outros aquíferos, como Mancuso et al. (2014) e Freitas (2016), observaram valores muito superiores a esse patamar, chegando a mais de 30°C. Além disso, temos que na hipótese de ocorrência de interações entre os aquíferos poderiam ser gerados também diferentes níveis de misturas entre as águas, causando alterações na temperatura. Porém, o fato de que não foram observadas temperaturas muito elevadas, bem como uma correlação direta e clara entre esse parâmetro e os grupos definidos, tanto para as águas do SAG, quanto do SASG, é coerente que para esse estudo a temperatura não seja utilizada como um traçador para indicar uma influência das águas do SAG sobre o SASG.

Com base nas informações levantadas na avaliação das características hidroquímicas do SASG na região, bem como nas observações feitas por outros autores, temos que os principais parâmetros que podem ser utilizados na avaliação das interações entre as águas do SAG e do SASG são o sódio, o sulfato e a condutividade elétrica, e de maneira secundária o cloreto e o fluoreto. Nesse sentido, dois grupos de águas despontam com fortes indícios na ocorrência desses processos, o C3-SASG e o C4-SASG.

5.3.4.3. Análise isotópica

A avaliação das características isotópicas das águas do SASG e do SAG visaram compreender a existência de padrões distintos para cada sistema aquífero, e se esses padrões poderiam ser utilizados como marcadores isotópicos que poderiam nortear os estudos quanto a interação entre as águas do SAG e do SASG nessa região.

Para este estudo foram utilizadas as informações das águas de 29 poços, obtidas a partir da coleta em campo, sendo 9 do SAG e 20 do SASG (Figura 86). No Anexo E são apresentadas as razões isotópicas $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para cada Sistema Aquífero.

Na comparação das razões isotópicas com as retas meteóricas global (RM Global) e de Porto Alegre (RM Porto Alegre) é possível verificar um agrupamento dessas águas próximas dessas retas, sem grandes deslocamentos (Figura 87).

O agrupamento dos poços forma dois conjuntos, um com valores mais depletados para $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, e composto por 6 poços (5 do SAG e 1 do SASG), e outro com características menos depletadas, apesar de distribuídos em uma faixa maior de valores, e formado por 23 poços (4 do SAG e 19 do SASG).

Figura 86 - Localização dos poços do SAG e SASG das análises isotópicas.

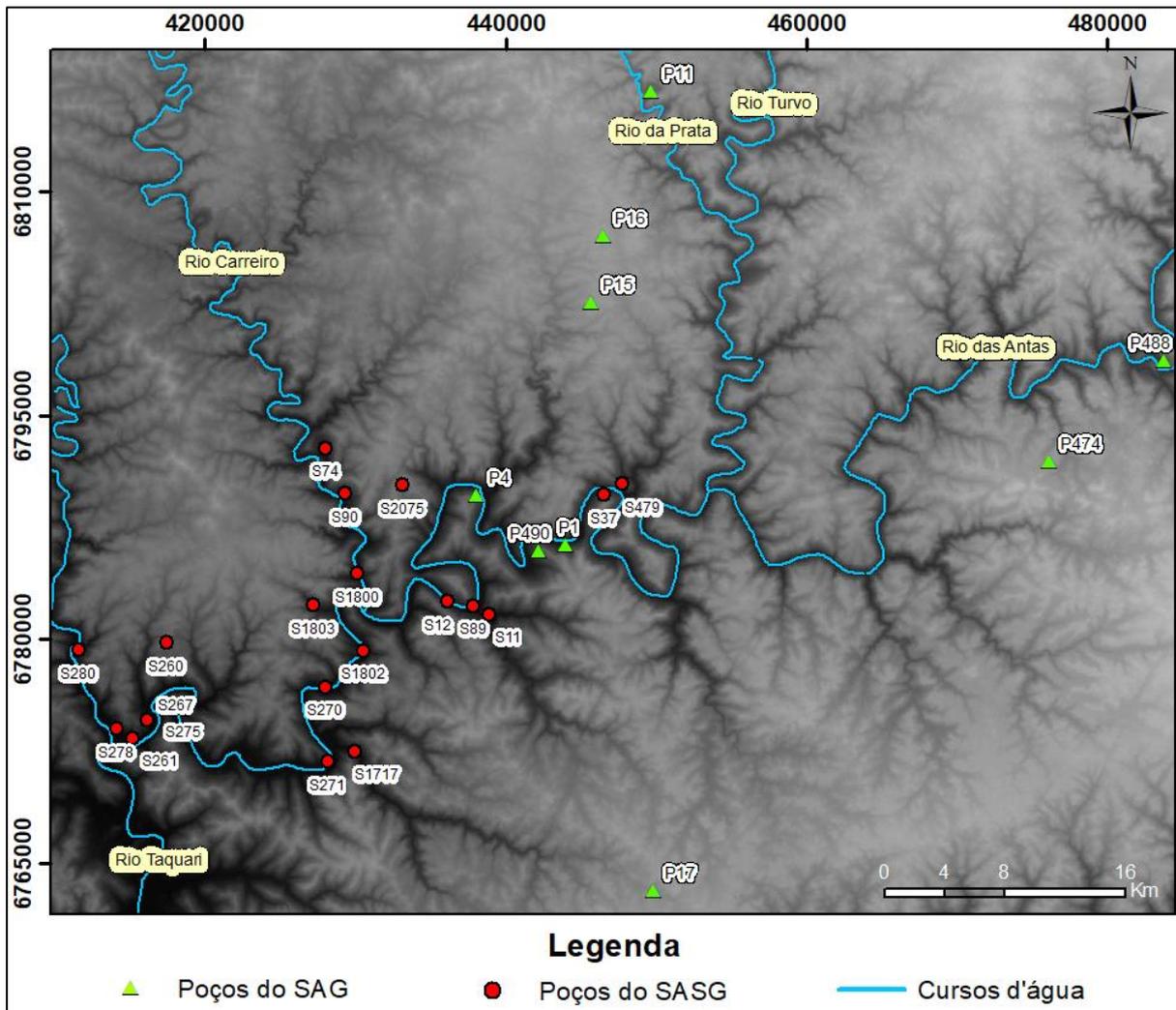
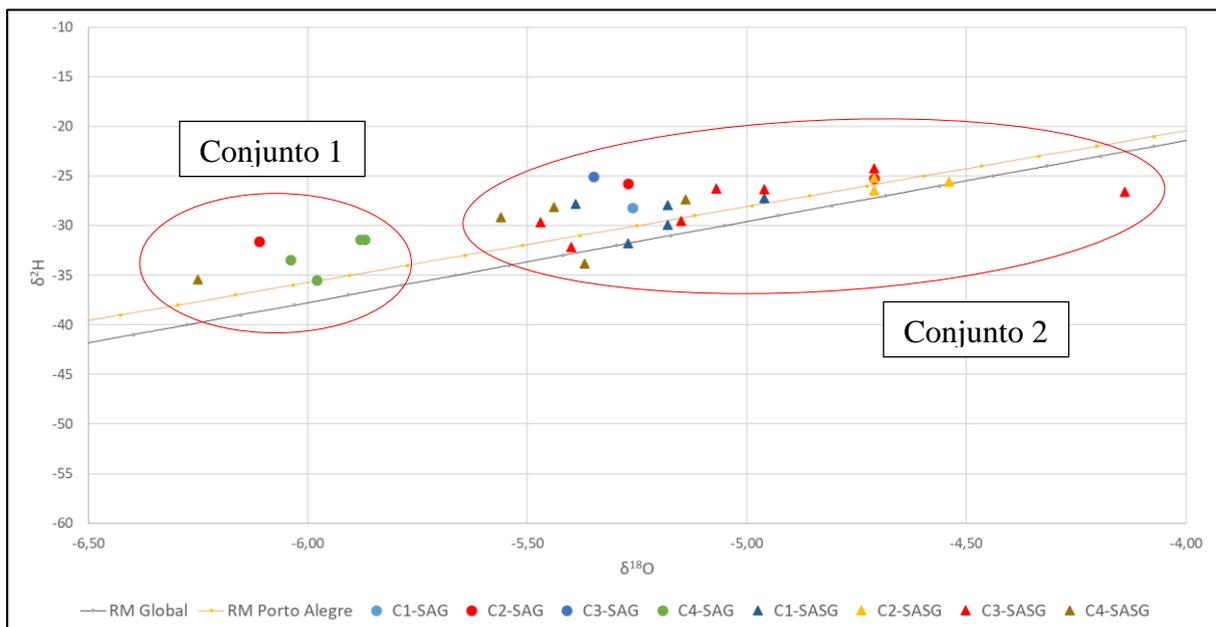


Figura 87 - Relações entre as razões isotópicas e as retas meteóricas.



Verificou-se que os poços referentes ao SAG foram observados nos dois conjuntos, apresentando razões isotópicas mais e menos depletadas. Em comum nos poços do SAG do conjunto 1, temos que eles possuem águas sulfatadas sódicas, com valores elevados de sódio, sulfato, fluoreto e condutividade elétrica, além de não possuírem contribuição de águas do SASG no interior do poço. O grau de confinamento e a sua localização não surgem como um fator preponderante, visto que dois deles (P15 e P16), estão localizados no alto do morro, com um confinamento próximo de 800 m, enquanto os demais estão posicionados no Vale do Rio das Antas (P4 e P488) e no Vale do Rio da Prata (P11), e possuem confinamento de 270 m, 168 m e 614 m, respectivamente.

Dos quatro poços do SAG que compõem o conjunto 2, três deles (P1, P17 e P474) se agrupam muito próximos, enquanto o outro (P490) se encontra menos depletado para $\delta^{18}\text{O}$. O poço P490 se diferencia dos demais pelo fato de que possui contribuição de água de fraturas das rochas vulcânicas no interior do poço, o que pode ter influenciado nas suas razões isotópicas menos depletadas. Já no poço P17, as informações construtivas indicam que isso não ocorre, enquanto nos outros dois poços não se têm certeza, visto que as informações não existem nos relatórios. A hidroquímica desses poços varia de águas bicarbonatadas cálcicas (P474), a sulfatada sódica (P1 e P490), e a sulfatada ou cloretada sódica (P17), não indicando uma relação direta entre a isotopia e a hidroquímica. Levando em consideração a localização desses poços, temos que dois deles (P1 e P490) se encontram muito próximos, no Vale do Rio das Antas, não muito distante de P4, enquanto os outros dois se posicionam nas áreas altas topograficamente, na região central da área de estudo.

De maneira geral, as razões isotópicas encontradas para o SAG na área de estudo, com variação entre -4,71‰ e -6,11‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e entre -25,07‰ e -35,48‰ para $\delta^2\text{H}$, se encontram menos depletadas que as verificadas por outros autores, como Silva (1983) e Kimmelman et al. (1986), nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil, mas são próximas das encontradas por Nanni et al. (2013) e Freitas (2016) no estado do RS, sugerindo uma influência temporal e espacial na variabilidade isotópica das águas do SAG.

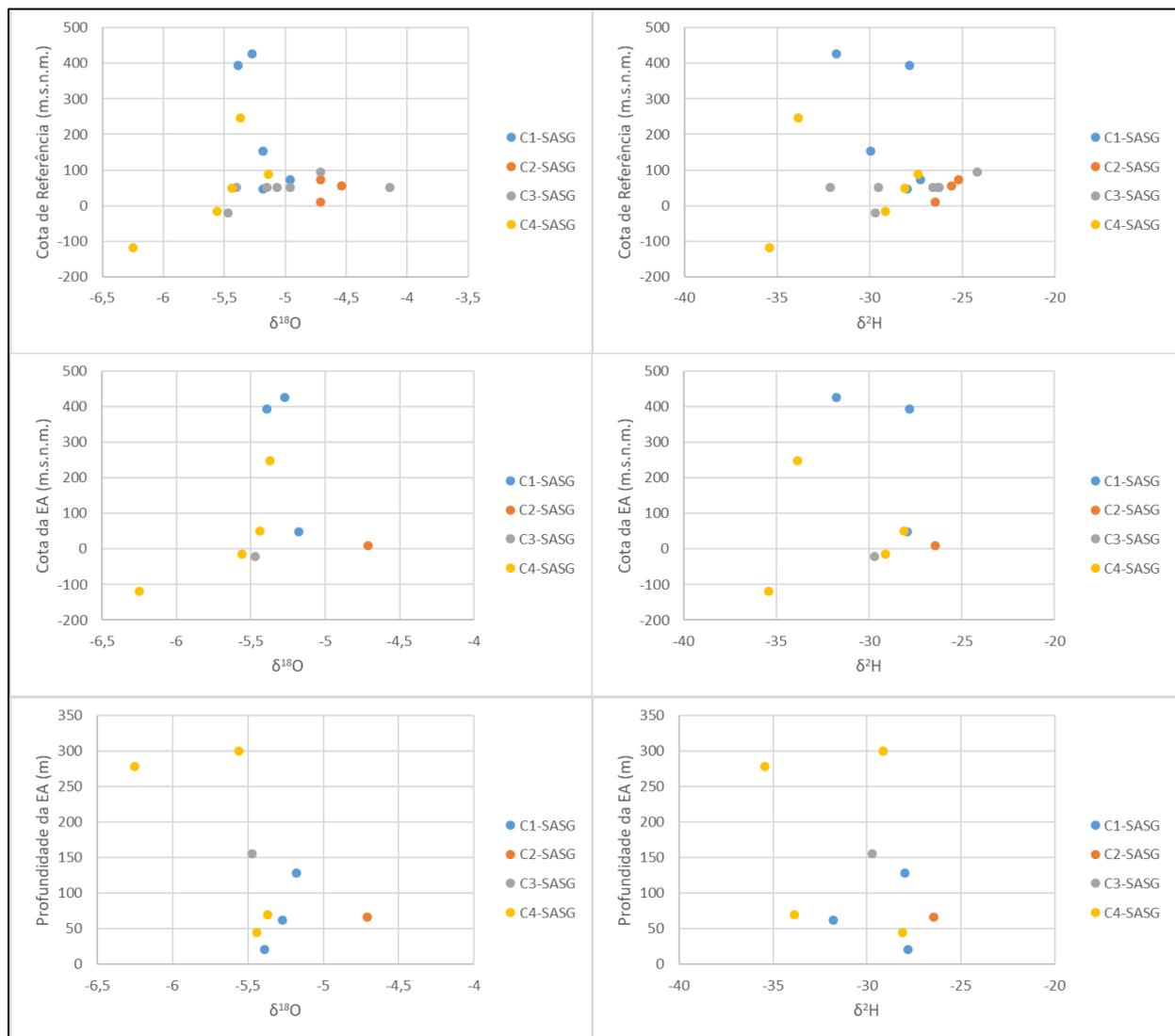
Os poços referentes ao SASG foram encontrados quase que exclusivamente no conjunto 2, com razões isotópicas menos depletadas, com a exceção ocorrendo no poço S90. Esse poço, além de apresentar características hidroquímicas similares às dos poços do SAG, possui uma particularidade com relação aos demais poços do SASG, que é a sua única entrada de água com 278 m de profundidade, muito abaixo da potencimetria do SAG na região.

Os poços do SASG que compõem o segundo conjunto possuem uma variação das razões isotópicas de -4,14‰ a -5,56‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e de -24,21‰ a -33,86‰ para $\delta^2\text{H}$, bem

diferente dos valores encontrados em S90, que foram de -6,25‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e de -35,42‰ para $\delta^2\text{H}$. Assim como para as águas do SAG, também foi verificada diferenças entre as razões isotópicas de outras regiões do Brasil com as encontradas na área de estudo. No estado de SP, Gastmans et al. (2016) verificou águas bem mais depletadas, enquanto no RS, Nanni et al. (2013) e Freitas (2016) encontraram valores similares aos encontrados no estudo.

Chama a atenção no segundo conjunto de poços a ausência de um padrão isotópico bem definido para as águas do SASG, visto que foram identificadas razões isotópicas similares entre os poços com e sem indício de interação entre os aquíferos. Levando em consideração as características hidrogeológicas dos poços, como profundidade das entradas de água, cota das entradas de água e cota de referência, não foi possível identificar tendências que poderiam explicar as variações da isotopia nas águas do SASG (Figura 88).

Figura 88 - Relações entre as características do SASG e as razões isotópicas.



Essa variabilidade para as águas do SASG provavelmente se deve às origens das precipitações no estado do RS, que segundo Griebler Júnior (2018), apresentam características isotópicas distintas quando proveniente das regiões tropicais ou polares, sendo ainda influenciada por eventos extremos de precipitação. Bortolin (2014), por exemplo, ao analisar as características isotópicas das águas precipitadas no município de Carlos Barbosa, dentro da área de estudo, verificou uma grande variação das razões isotópicas ao longo do ano, de -7,80‰ a -11,73‰ para $\delta^{18}\text{O}$, e de -8,63‰ a -61,56‰ para $\delta^2\text{H}$.

Essas diferenças nas precipitações que recarregam o SASG ao longo dos anos, com características isotópicas distintas, bem como os fatores hidrogeológicos relacionados às estradas de água, podem provocar diferentes graus de misturas no complexo sistema de fraturas que formam o SASG, de modo a inviabilizar a determinação de um padrão isotópico para essas águas. Assim, sem uma isotopia bem definida para o SASG, não é possível determinar um padrão que represente as interações com o SAG, que poderia servir de marcador para os estudos nessa região.

Quanto ao poço S90, que possui razões isotópicas até mais depletadas que as encontradas nos poços do SAG, uma possibilidade para explicar sua isotopia é que devido a profundidade da entrada de água, exista pouca ou nenhuma contribuição recente proveniente de fraturas mais superficiais nas rochas vulcânicas, podendo ter na sua composição uma maior parcela de água do SAG. Pela quantidade amostral e suas particularidades, não é interessante defini-la como uma água padrão para indicar interação entre os sistemas aquíferos.

5.3.5. Análise das estruturas que atuam na compartimentação do SAG

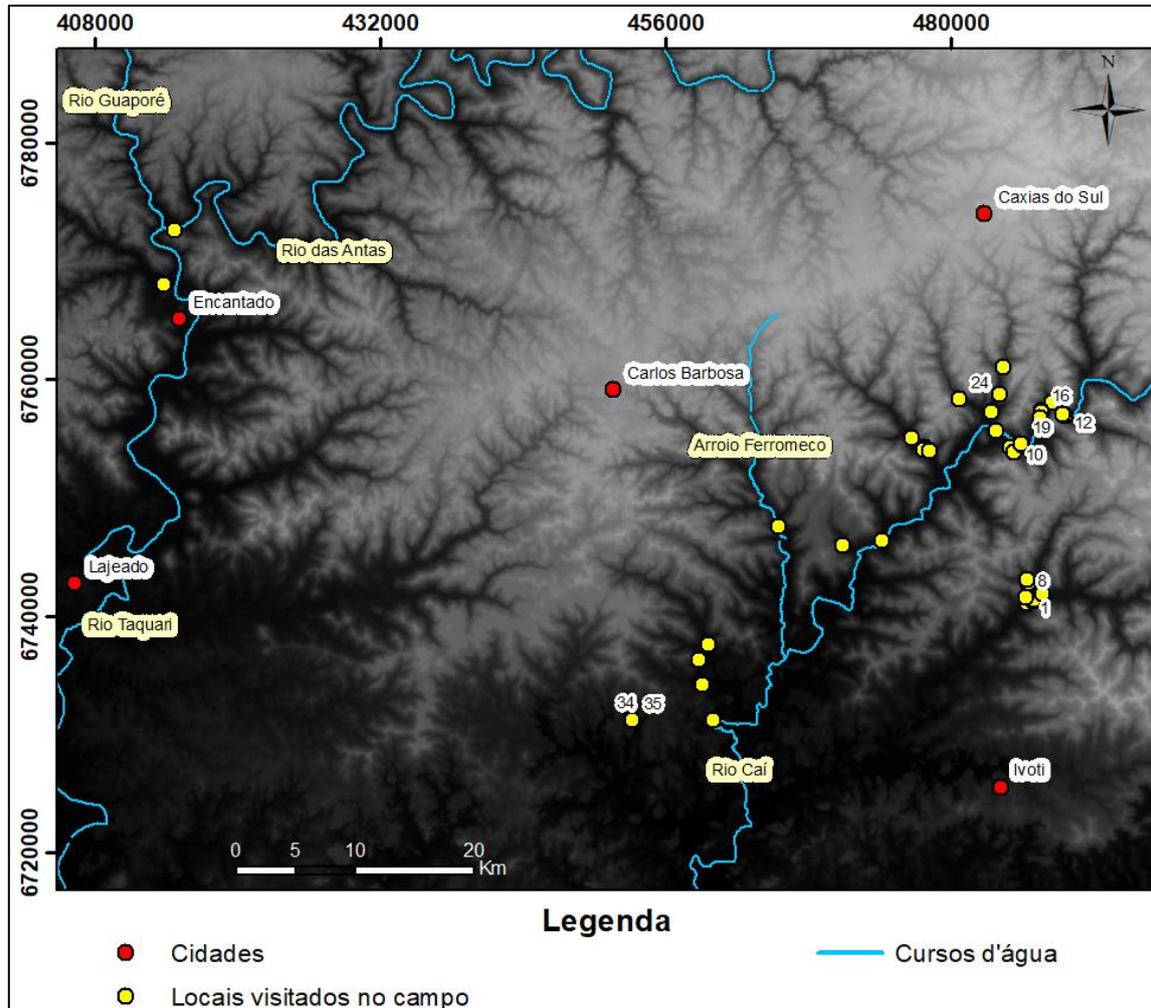
O conjunto de informações geológicas, hidrogeológicas e estruturais, permitiram a identificação das principais estruturas, representadas pelos lineamentos morfoestruturais existentes na região, e que possuem atuação tanto em escala local, quanto regional. Além disso, as informações levantadas em campo quanto ao topo do SAG, e a identificação de estruturas, foram utilizadas de forma complementar para a tomada de decisões. Para esta etapa do trabalho, as morfoestruturas, na forma dos lineamentos, foram chamadas de estruturas.

5.3.5.1. Levantamento de campo

No levantamento de campo foram visitados 39 pontos ao longo de vários trechos de rodovias federais e estaduais, bem como de algumas estradas menores (Figura 89), de modo a

observar os afloramentos de rochas vulcânicas e sedimentares, e quando possível, o contato entre elas. Além das litologias, também foi verificada a presença e a orientação de estruturas, como fraturas e diques.

Figura 89 - Localização dos pontos visitados, com destaque para os citados no trabalho.



Um lugar a ser destacado é ponto 8, onde apesar de não ter sido encontrado o contato entre as diferentes litologias, o fato de as rochas vulcânicas apresentarem uma zona amigdalóide, típica de limite de derrame, pode indicar que o contato pode estar próximo da cota 164 m. Isso fica mais evidente a partir da identificação, em uma distância de 50 m deste local, na cota 156 m, da presença de arenitos silicificados. Nos pontos 34 e 35, distantes 70 m um do outro, verificou-se a existência, respectivamente, de basalto muito intemperizado com presença de amígdalas e de um arenito silicificado (Figuras 90a e 90b), o que indica que o contato entre eles pode estar ocorrendo entre as cotas 61 m e 51 m. O único local onde foi verificado o contato entre as rochas vulcânicas e sedimentares foi no ponto 16, onde ele ocorre na cota 116 m.

Figura 90 - (a) basalto intemperizado com presença de amígdalas (ponto 34) (b) arenito (ponto 35). Escala representativa: martelo com 40cm.



Em alguns locais, como nos pontos 1 e 10 (Figuras 91a e 91b), foram encontradas fraturas nos arenitos. No ponto 1 as fraturas apresentam direção E-W, e no ponto 10 direções E-W, N-S e N40E. As fraturas encontradas nos basaltos do ponto 2 apresentaram direções principais E-W, enquanto que no ponto 12 temos fraturas N-S e N60W (Figura 91c e 91d). Vale salientar a existência de grandes estruturas mapeadas na escala 1:1.000.000 que possuem essas mesmas direções, como as identificadas no Vale do Rio Caí. Isso é importante pois indica um reflexo dessas estruturas não só nas rochas vulcânicas, como também nos arenitos.

Figura 91 - (a) arenito fraturado no ponto 1 (b) arenito fraturado no ponto 10 (c) basalto fraturado no ponto 2 (d) basalto fraturado no ponto 12. Escala representativa: caneta em (a) com 15cm, escala em (b) e (c) com 8cm, e martelo em (d) com 40cm.



Verificou-se também nessa região do Vale do Rio Caí a presença de intrusões vulcânicas na forma de diques de diabásio, identificadas nos pontos 19 e 24 (Figura 92), apresentando espessura variável, chegando a até 2 m.

Figura 92 - Intrusão de diabásio no ponto 19. Escala representativa: martelo com 40cm.

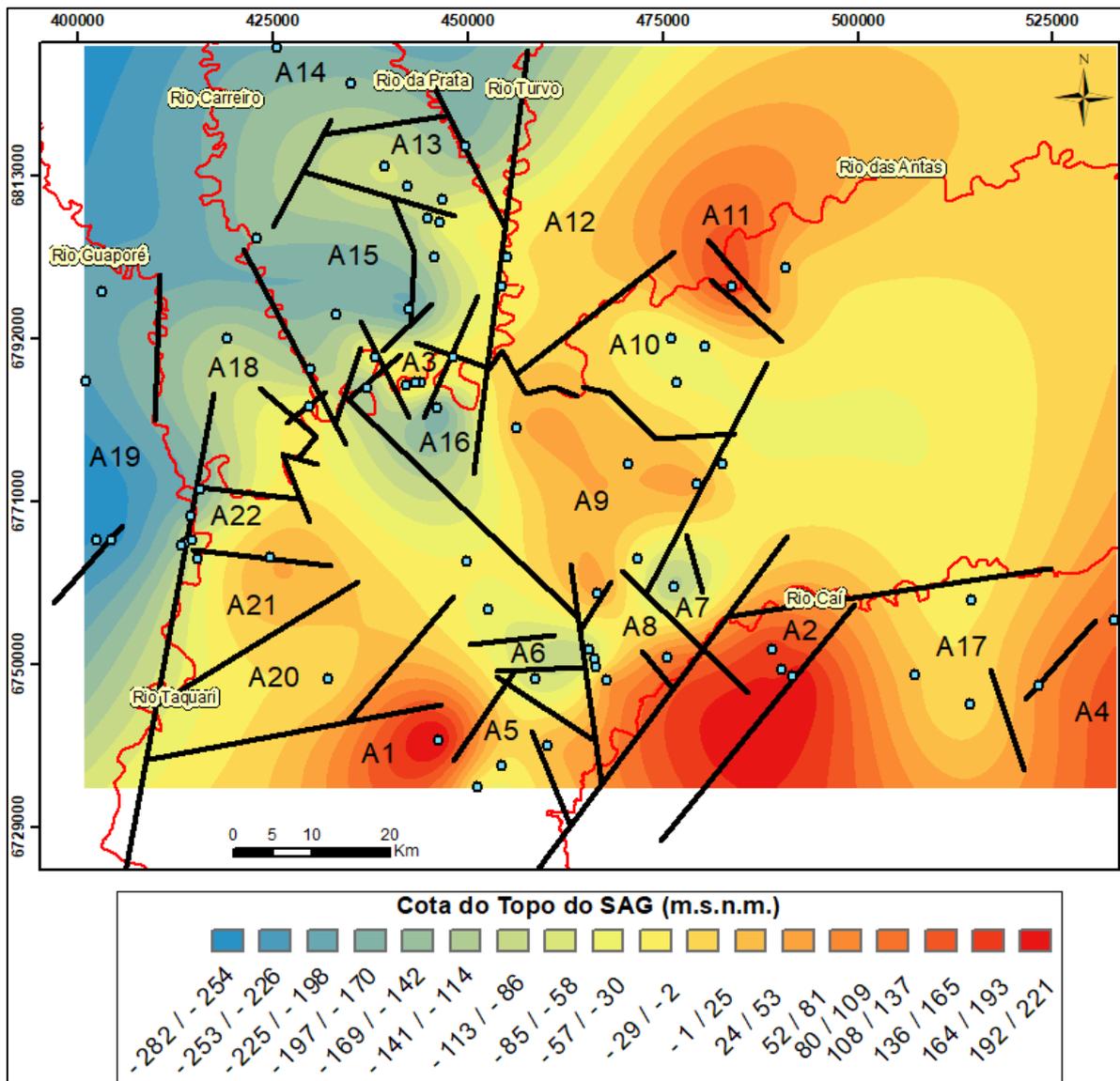


5.3.5.2. Influência das estruturas na variação regional do topo do SAG

As estruturas traçadas na escala 1:1.000.000 foram sobrepostas ao mapa da cota do topo do SAG de modo a verificar quais delas poderiam explicar as variações existentes na área (Figura 93). Dessa forma, foram destacadas aquelas localizadas entre as regiões de transição de cotas altas e baixas e que poderiam atuar na formação de blocos na região. Para esta análise, foi incluído um poço pertencente ao SASG, o S36, por sua base, na cota -137 m.s.n.m., indicar um posicionamento do topo do SAG abaixo do que foi encontrado em poços próximos.

Com base nessas informações verificou-se que grandes estruturas, ou conjuntos de estruturas, são responsáveis pela formação de blocos altos e baixos, que por vezes se alternam ao longo da área de estudo.

Figura 93 - Principais estruturas que atuam sobre a cota do topo do SAG, com os cursos d'água destacados em vermelho.



As áreas A1, A2, A4 e A8, localizadas na faixa sul da área de estudo, próxima da escarpa, representam quatro blocos onde o topo do SAG se encontra bem elevado, tendo entre elas duas áreas, A5 e A17, onde o topo se encontra mais baixo. As características dessa área indicam uma tendência de decréscimo do topo em direção aos vales, que é um comportamento já observado no estudo da Área da Escarpa.

Na região central temos a presença de três áreas que representam blocos baixos, A6, A7 e A16. A existência de grandes estruturas, que aparentemente também afetam outras áreas, bem como a informação que essas áreas mais baixas são representadas por cotas de diferentes níveis de profundidade, indicam que se trata de três áreas baixas distintas, e não um único grande bloco baixo.

As áreas A9 e A11 correspondem a dois blocos altos, separados entre si por um bloco baixo (A10). Verificou-se entre A9 e A10 a presença de várias estruturas de menor porte, que representam segmentos de uma grande estrutura nessa área. Além disso, é possível que um conjunto de estruturas localizado no Vale do Rio das Antas esteja atuando na variação do topo do SAG entre essas três áreas e a A12.

Na região do Rio das Antas, em especial o trecho entre os municípios de Bento Gonçalves, Cotiporã e Veranópolis, existe a influência de diversas estruturas de menor porte que são responsáveis pela formação de blocos, como o A3 e o A16. Vale ressaltar que o bloco alto se encontra sobre a calha do rio, enquanto o bloco baixo está posicionado nas áreas de maior cota do terreno, no alto do morro, no distrito de Tuiutí. Isso é importante porque demonstra que os blocos baixos não necessariamente estão posicionados nas áreas próximas dos vales, reforçando a existência de atuação estrutural.

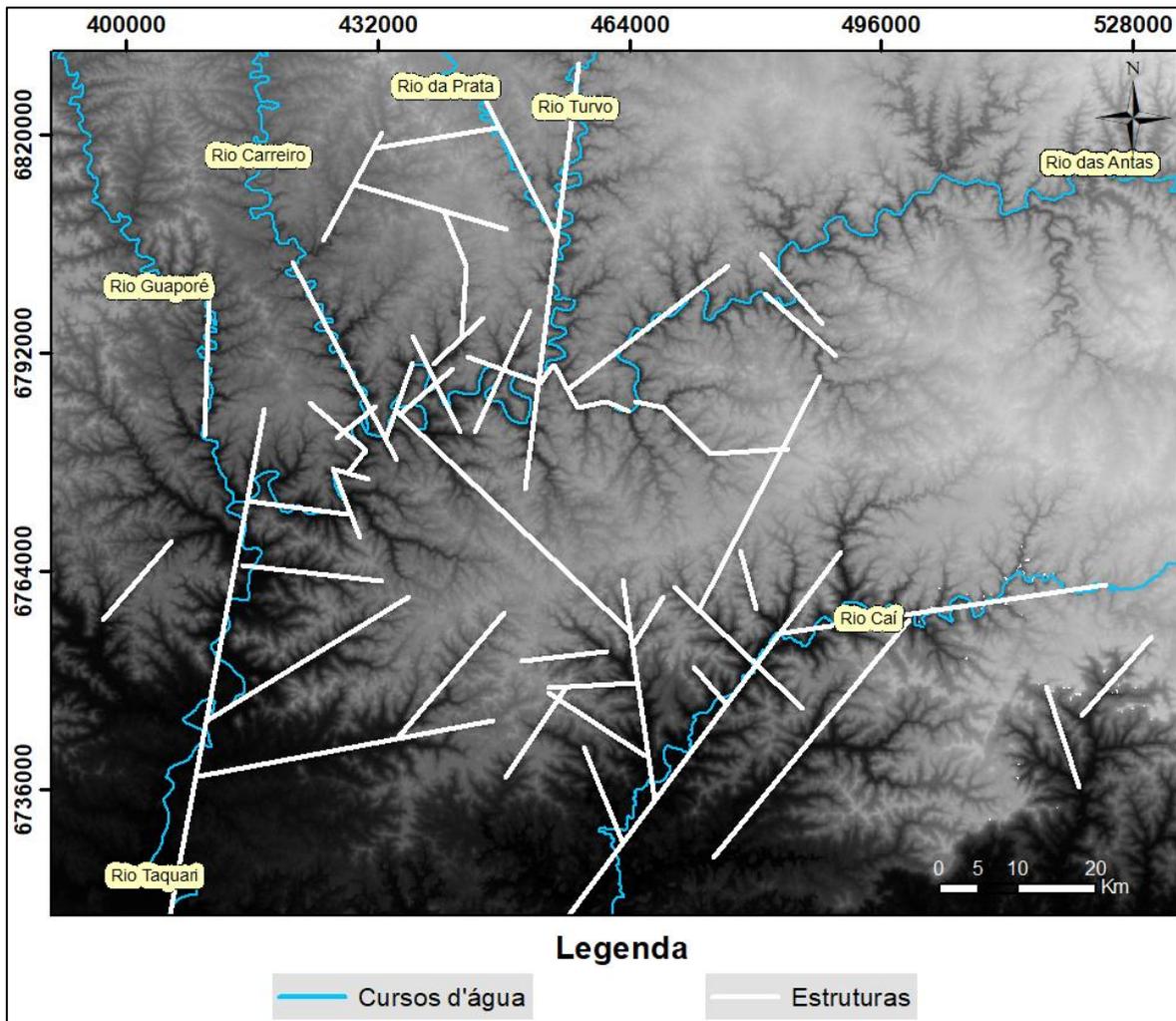
Seguindo em direção ao norte da área de estudo destaca-se a área A13, representada por um bloco onde as cotas do topo do SAG se encontram mais elevadas, e está posicionada entre dois blocos baixos A14 e A15. Ressalta-se ainda a atuação da estrutura N10E no Vale do Rio da Prata, na separação entre os blocos A12 e A13.

Próximo ao Vale do Rio Taquari, na porção oeste da área de estudo temos dois blocos mais elevados, A20 e A21, com tendência de decréscimos das cotas em direção ao vale, representado por A22. A grande estrutura N11E, identificada sobre o vale, representa um limiar para as cotas do topo do SAG, que tendem a apresentar valores cada vez mais negativos conforme se distancia do vale em direção à oeste da área de estudo, representada pela área A19.

O bloco formado pela área A18, apesar de ser composto por cotas negativas, pode ser considerado com um bloco alto, se levarmos em consideração os três blocos baixos que o limitam, A15, A16 e A19. Chama a atenção o fato de que esse bloco está localizado em áreas mais elevadas topograficamente e a cota do topo se encontrar próxima de -120 m.s.n.m., enquanto na porção do Vale do Rio das Antas próxima desse bloco, o topo se encontra mais elevado.

Dessa forma, a avaliação das estruturas com relação ao topo do SAG indica a existência de vários blocos, altos e baixos, que se alternam ao longo da região, com diferentes tamanhos, e que são formados pela atuação das estruturas de diferentes portes. Na Figura 94 são apresentadas as principais estruturas que atuam regionalmente na variabilidade do topo do SAG.

Figura 94 - Estruturas que atuam regionalmente sobre o topo do SAG.

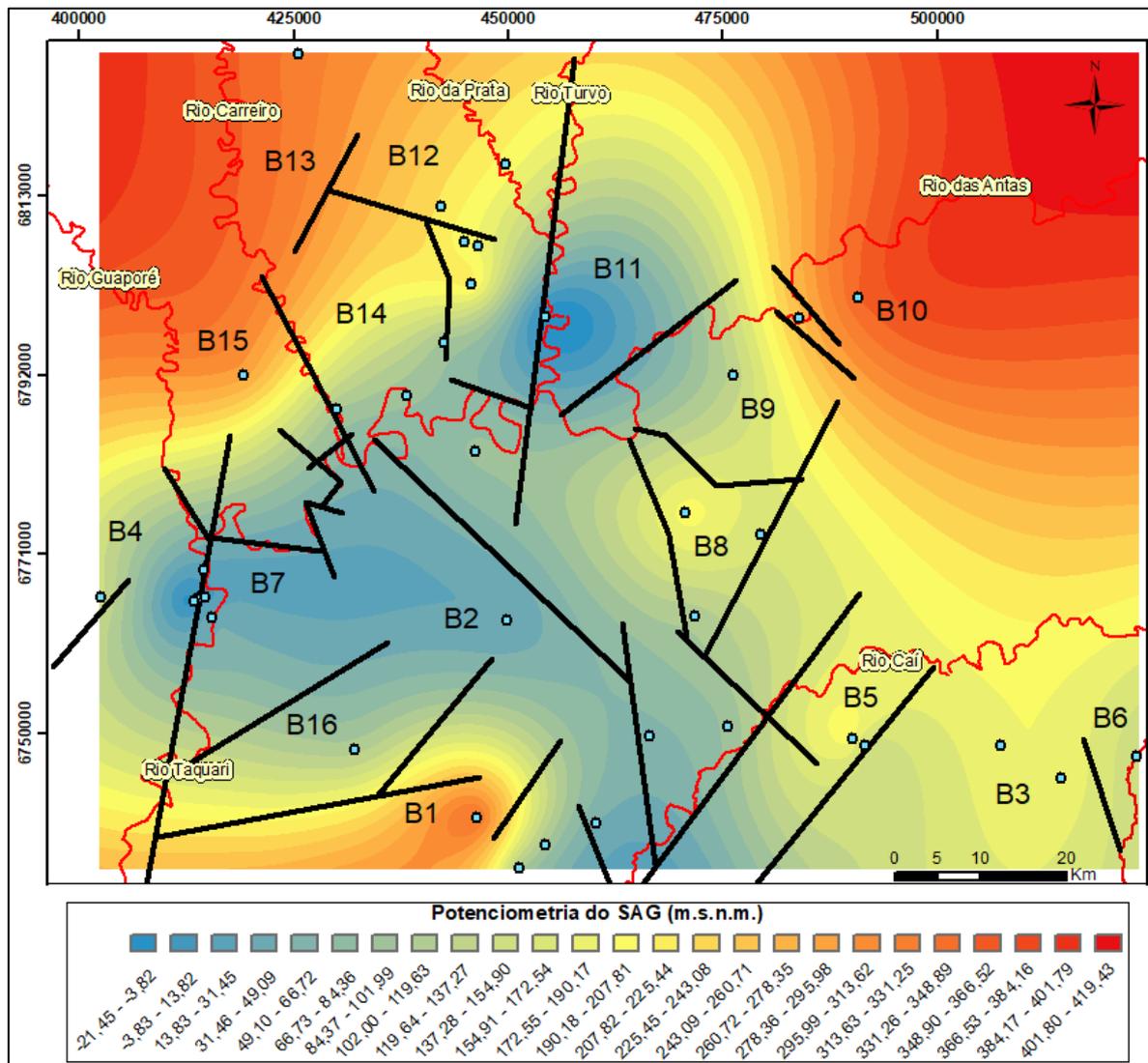


5.3.5.3. Influência das estruturas na variação regional da potenciometria do SAG

A atuação das estruturas sobre a potenciometria do SAG foi avaliada de duas formas. A existência de estruturas que poderiam ser responsáveis por quebras significativas na potenciometria, isto é, variações potenciométricas entre as áreas muito grandes se comparadas a distância entre elas, e estruturas posicionadas em áreas de baixo potenciométrico, que poderiam estar funcionando como zonas de descarga do aquífero (Figura 95).

Ao analisar a faixa sul da área de estudo verificou-se a existência de dois importantes altos potenciométricos, formado pelas áreas B1 e B5/B3, separados entre si por um baixo potenciométrico, localizado no Vale do Rio Caí. De modo regional, o fluxo tende a seguir desses altos em direção ao vale, que possivelmente esteja funcionando como uma zona de descarga do aquífero. Verificou-se também um decréscimo da potenciometria em direção ao rio onde se situa a área B6, a partir do alto potenciométrico B3.

Figura 95 - Principais estruturas que atuam sobre a potencimetria do SAG, com os cursos d'água destacados em vermelho.



Ao norte temos o fluxo seguindo das potencimetrias mais elevadas em B13 e B10 em direção ao Vale do Rio da Prata, em B11. Da mesma forma como verificado na faixa sul, existe uma quebra significativa da potencimetria entre B13 e B11, representada por uma área de transição (B12). É importante salientar que a potencimetria do SAG na região do Vale do Rio da Prata se encontra pelo menos 250 m abaixo do nível da água do rio.

A área B14 representa uma região próxima a calha do Vale do Rio das Antas e do Vale do Rio Carreiro, onde a potencimetria encontrada tende a ser muito próxima ao nível dos rios, indicando que esta área possa estar funcionando como uma zona de descarga do aquífero. Isso poderia estar ocorrendo devido ao alto fraturamento da região, o que poderia estar contribuindo para o alívio da pressão hidrostática do SAG, e assim proporcionando potencimetrias equivalentes às encontradas nos rios.

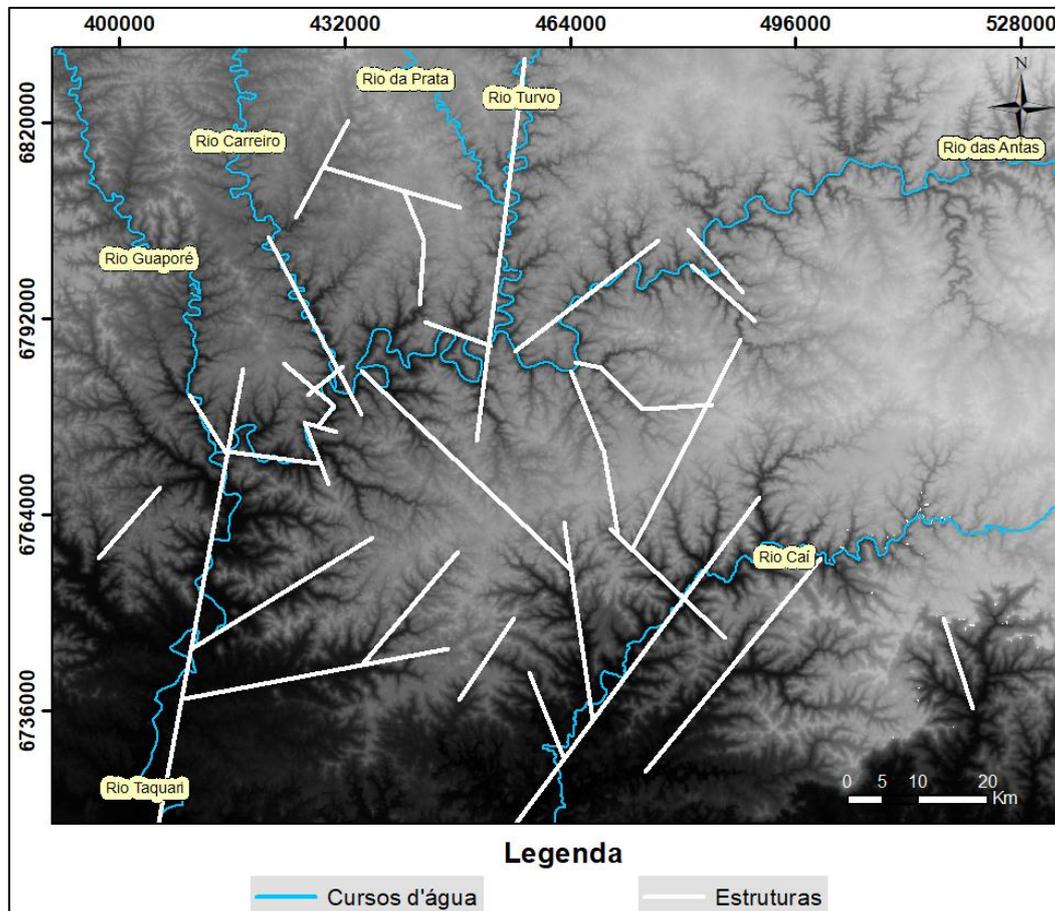
A área B7 representa a região do Vale do Rio Taquari, onde a potenciometria se encontra mais baixa que as áreas adjacentes (B1, B15, B16 e B4), indicando um fluxo para essa região. Essa tendência de fluxo em direção a este vale também foi observada no estudo da Área da Escarpa, onde a calha desse rio foi caracterizada como uma grande zona de descarga do SAG.

A área B2 se destaca por uma característica peculiar, que é o seu posicionamento em um baixo potenciométrico, mesmo essa área se tratando de uma região elevada topograficamente, distante dos vales.

Na porção nordeste temos a presença de duas áreas com potenciometria elevada, B8 e B10, intercaladas pela a área B9, de potenciometria mais baixa. A presença de conjuntos de estruturas nessa região indica a formação de blocos com características potenciométricas distintas.

A atuação das estruturas no comportamento regional da potenciometria SAG mostra que elas são responsáveis por proporcionar casos com significativa variação desses valores, além de representar zonas para o qual o fluxo de água subterrânea se direciona (Figura 96).

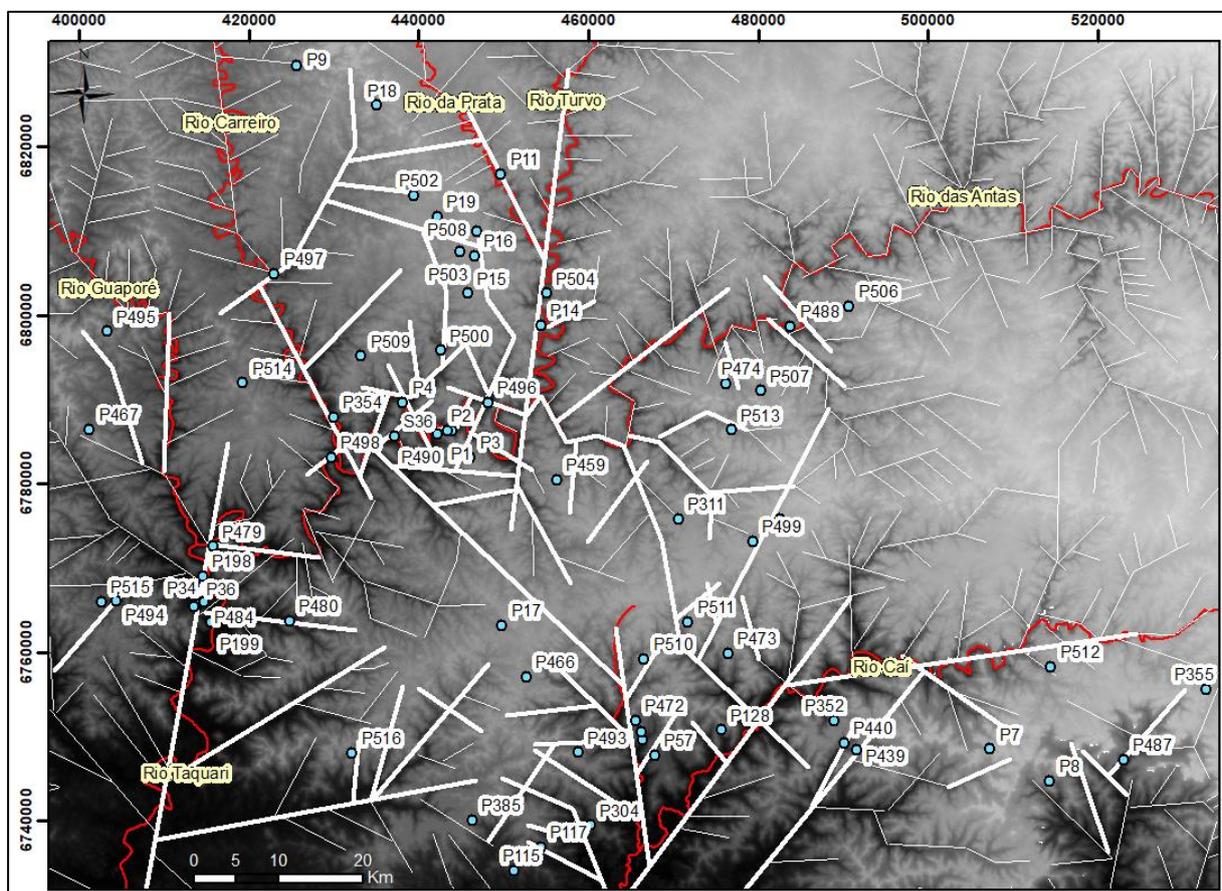
Figura 96 - Estruturas que atuam regionalmente sobre a potenciometria do SAG.



5.3.5.4. Atuação das estruturas na variação das características locais do SAG

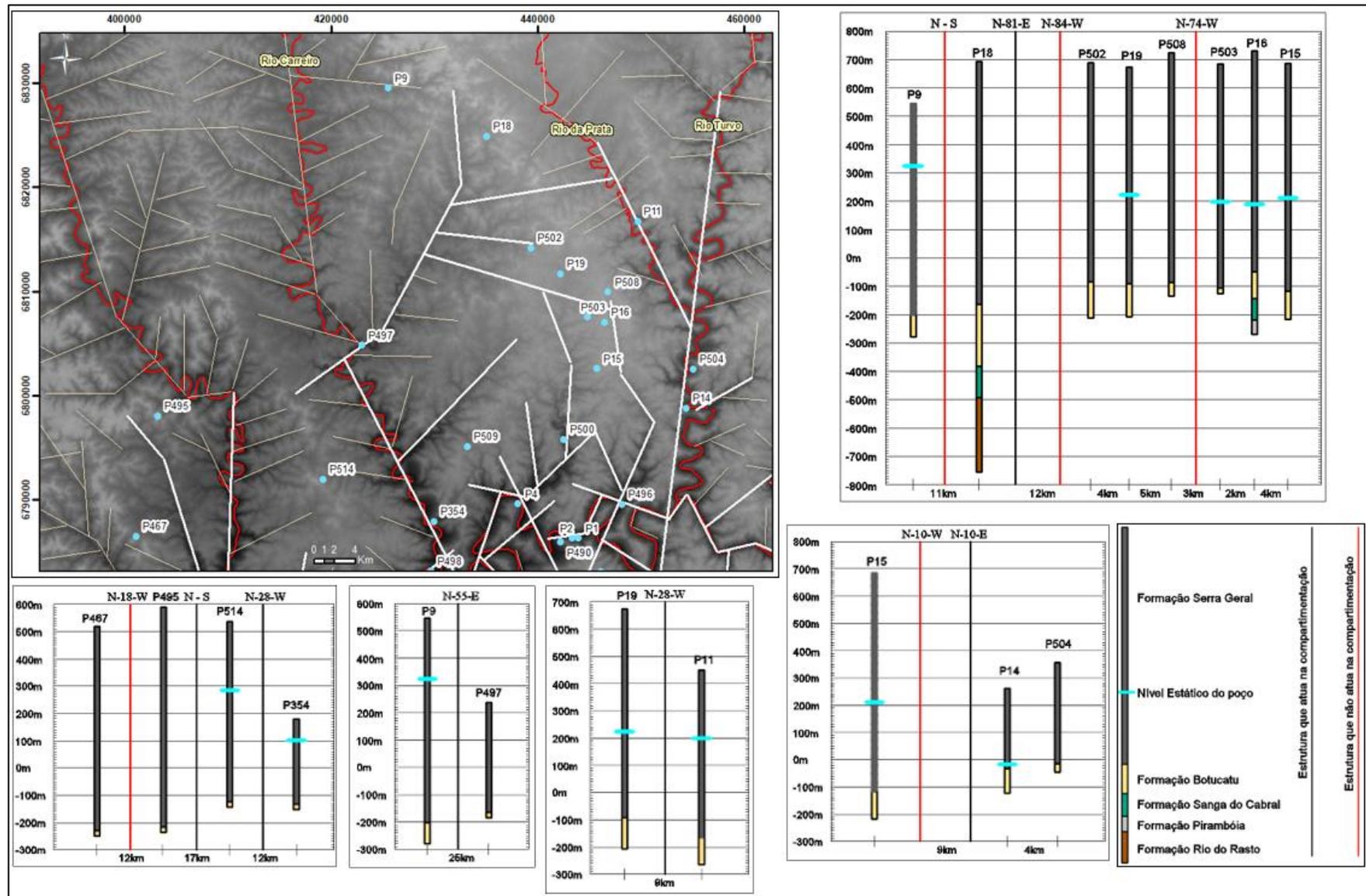
Nessa análise ponto a ponto verificou-se a atuação das estruturas sobre o topo do SAG e na potenciometria, bem como sobre a espessura das rochas sedimentares. Diferentemente das avaliações anteriores onde o foco foram as variações regionais, neste caso levou-se em consideração as estruturas existentes entre poços e as possíveis variações entre as áreas. Para tanto, utilizou-se as informações desses poços, e das estruturas entre eles, que foram destacadas nos perfis em preto quando atuam na compartimentação, e em vermelho quando não existe essa atuação. Na Figura 97 são apresentadas as principais estruturas que separam os poços na região.

Figura 97 - Principais estruturas com atuação local sobre o SAG.



A primeira região avaliada está localizada ao norte da área de estudo, e compreende um conjunto de poços profundos posicionados em áreas mais elevadas, e em alguns vales, como o do Rio da Prata e do Rio Carreiro (Figura 98).

Figura 98 - Perfis representativos da região norte da área de estudo.



A área onde se localizam os poços P15, P16, P19, P502, P503 e P508, apresenta, em geral, uma cota do topo do SAG com pouca variação, próxima da cota -100 m.s.n.m. Outro fato que reforça a atuação menos intensa das estruturas nessa área é a existência de uma potenciometria regional do SAG, próxima da cota 200 m.s.n.m.

A atuação das estruturas ocorre de forma mais intensa entre esse conjunto de poços (P9-P15-P16-P19-P502-P503-P508), e os poços P9 e P18, devido principalmente pela existência da estrutura N81E, que proporciona uma variação de pelo menos 80 m, se levarmos em conta os poços P18 e P502, e de quase 120 m se levarmos em conta o poço P9. Além disso, existe uma quebra significativa na potenciometria, se levarmos em conta o poço P9 e os poços localizados do outro lado da estrutura.

Entre os poços P497 e P9 destaca-se um conjunto de estruturas NE, que podem ser a responsável pela variação de 36 m do topo do aquífero, em especial a de orientação N55E. Apesar de que essa variação pode ter relação com o paleorelevo, existe a possibilidade dessas estruturas também estarem atuando sobre a potenciometria do SAG na área, o que não pode ser confirmado em função da inexistência da potenciometria no poço P497. Essa possibilidade se deve ao fato de que o poço P497, por não ser jorrante, teria que possuir uma potenciometria no máximo no nível do terreno, que é de 238 m, ou seja, pelo menos 86 m abaixo da potenciometria encontrada em P9.

A análise seguinte leva em consideração a atuação da estrutura de mais de 20 km encaixada no Vale do Rio da Prata, e as informações dos poços P19 e P11, sendo este último localizado próximo a calha do rio. As características entre essas duas áreas indicam que a estrutura N28W proporciona uma variação no topo do SAG de mais de 70 m, mas que apesar disso, a pequena diferença na potenciometria entre as áreas, com decréscimo em direção ao vale, sugere que esta estrutura não influencia na potenciometria do SAG.

Diferentemente do caso anterior, a estrutura N10E de 55 km encaixada no vale que separa o poço P15, de P14 e P504, tem forte influência tanto sobre o topo do SAG quanto na potenciometria. Na área do vale, o topo se encontra bem mais elevado, pelo menos 85 m acima do que o encontrado em P15, mas é a potenciometria que se destaca, com uma variação de 226 m. Essa grande diferença indica esta estrutura pode estar atuando para individualizar esses dois blocos, compartimentando o aquífero.

A estrutura N28W, encaixada no Vale do Rio Carreiro, possui uma importante atuação na região. Levando em consideração os poços P354 e P514 temos que os 183 m de diferença na potenciometria indica uma atuação dessa estrutura na compartimentação do SAG. Ao relacionar a área onde se encontra P495, com a do poço P514, temos uma variação de

aproximadamente 100 m no topo do SAG, que ocorre em função da atuação da estrutura N-S existente entre as duas áreas.

Na região do Vale do Rio das Antas temos a presença de várias estruturas, de diferentes portes, que cortam o vale, e proporcionam a formação de blocos altos e baixos na área (Figura 99).

Um exemplo disso é a grande variação no topo do SAG (94 m), e na potenciometria, entre as áreas dos poços P498 e P514, que mostram a importância do conjunto de estruturas existente no Vale do Rio das Antas para a compartimentação do SAG.

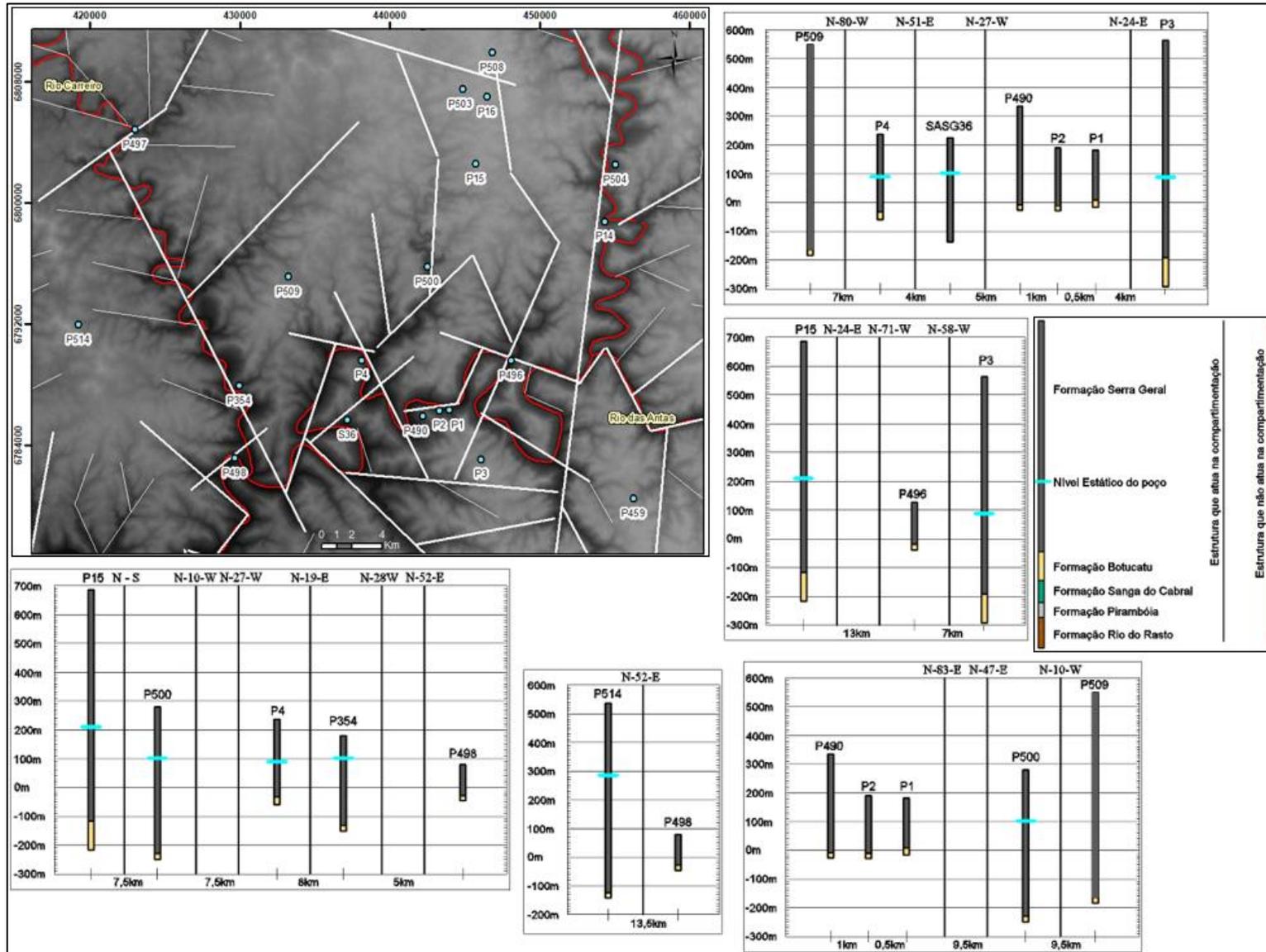
Seguindo da região onde se localiza o poço P15, em direção ao vale, temos uma estrutura de 9 km, com orientação N-S, localizada próxima ao poço P500. Essa estrutura provavelmente é a responsável pela grande variação do topo do SAG entre essas duas áreas, de 113 m, bem como a diferença de 109 m na potenciometria. Já na calha do Rio das Antas temos os poços P4 e P500, separados por duas estruturas, uma N10W e outra N27W, que proporcionam uma variação no topo do SAG de quase 200 m. Apesar disso, a potenciometria entre esses dois poços é muito similar, e possuem valores equivalentes aos níveis dos rios.

Nesse mesmo sentido, na área entre P4 e P354, apesar da variação significativa do topo do SAG, de 100 m, a potenciometria das duas áreas apresenta valores similares. Nesse caso específico é possível supor duas possibilidades, que a estrutura N19E esteja atuando no topo do SAG sem comprometer a potenciometria, ou que os valores similares da potenciometria se devam ao fato de que são equivalentes aos níveis dos rios, como visto no caso anterior.

Levando em consideração as informações do poço P509 quanto ao topo do SAG, verificou-se a atuação de duas estruturas. Com relação a área do poço P4 temos uma variação de 131 m, e a presença da estrutura N80W, enquanto que para a área do poço P500 destaca-se a estrutura N10W, que proporciona uma diferença de 66 m.

Como verificado em outros exemplos, a existência de várias estruturas que cortam o Vale do Rio das Antas é responsável, em nível local, por uma alternância de blocos altos e baixos. Nesse sentido, temos que mesmo blocos menores podem estar sujeitos a este processo. Próximo a P4 existe o poço S36, perfurado apenas nas rochas vulcânicas, onde as rochas sedimentares não foram interceptadas, e com a base desse poço posicionada 104 m abaixo do topo do SAG em P4, indicando uma significativa variação em uma distância de apenas 4 km. A estrutura N51E surge como provável responsável por essa variação, mas é possível que outras estruturas não identificadas que existam em subsuperfície possam estar provocando essa diferença, dada a existência de muitos fraturamentos na região.

Figura 99 - Perfis representativos da região do Vale do Rio das Antas.



Como verificado em outros exemplos, a existência de várias estruturas que cortam o Vale do Rio das Antas é responsável, em nível local, por uma alternância de blocos altos e baixos. Nesse sentido, temos que mesmo blocos menores podem estar sujeitos a este processo. Próximo a P4 existe o poço S36, perfurado apenas nas rochas vulcânicas, onde as rochas sedimentares não foram interceptadas, e com a base desse poço posicionada 104 m abaixo do topo do SAG em P4, indicando uma significativa variação em uma distância de apenas 4 km. A estrutura N51E surge como provável responsável por essa variação, mas é possível que outras estruturas não identificadas que existam em subsuperfície possam estar provocando essa diferença, dada a existência de muitos fraturamentos na região.

Esse processo fica ainda mais evidente ao avaliarmos o poço S36 com o conjunto de poços P1, P2, e P490, e o poço P3. Verificou-se que o conjunto de poços possui o topo do SAG em cotas mais elevadas, próximas de 0 m.s.n.m., sendo limitado por duas áreas onde o topo do SAG se encontra em cotas bem baixas, sendo pelo menos -137 m para o poço S36 e de -193 m para P3. Dentre as estruturas existentes na região destacam-se uma N27W entre S36 e o conjunto de poços, e uma N24E entre o conjunto e o poço P3. O traçado da estrutura NW indica que esta também é responsável pela variação do topo entre o conjunto de poços e P4.

Em uma região com a atuação de várias estruturas, como é o caso deste vale, é difícil apontar com certeza quais delas atuam sobre aquífero e com que intensidade. No caso entre os poços P15 e P496, duas estruturas se destacam, uma N24E, e outra N71W. Uma delas, ou ambas, podem ser responsáveis pela variação do topo do SAG de 100 m entre as áreas. Levando em conta a cota do terreno em P496, podemos afirmar que a potenciometria apresenta uma variação de pelo menos 84 m, indicando uma atuação dessas estruturas. Já entre P3 e P496, separados pela estrutura N58W, verificou-se uma grande variação no topo do SAG, de 174 m.

No Vale do Rio Carreiro, a grande estrutura N28W é a provável responsável pela variação no topo do SAG de mais de 100 m que existe entre os poços P354 e P498, apesar da existência também de outra estrutura, N52E, entre eles. Essa estrutura NW é a mesma identificada anteriormente entre P354 e P514, o que mostra sua atuação regional.

Entre as áreas do conjunto de poços P1, P2 e P490, e do poço P500, destacam-se duas estruturas, uma de maior porte, com orientação N47E, e uma menor, no Vale do Rio das Antas (N83E), e que faz parte da zona de fraturas que formam esse vale. Uma delas, ou ambas, proporcionam a grande variação do topo do SAG entre essas duas áreas, de mais de 200 m.

A região central se destaca pela presença de estruturas de maior porte bem definidas, que atuam na formação de grandes blocos nessa área, influenciando tanto no topo do SAG, quanto na potenciometria (Figura 100)

A análise das áreas entre os poços P3 e P459, demonstra a importância da estrutura N10E, encaixada no Vale do Rio da Prata, para a compartimentação do SAG. Assim como observado na porção norte, entre P15 e P14, nesta área verificou-se uma grande variação do topo do SAG, de 234 m.

Na porção leste da região central verificou-se a formação de três blocos distintos, um mais baixo na área onde se encontra os poços P474, P507 e P513, e dois mais elevados, nas áreas dos poços P311 e P488.

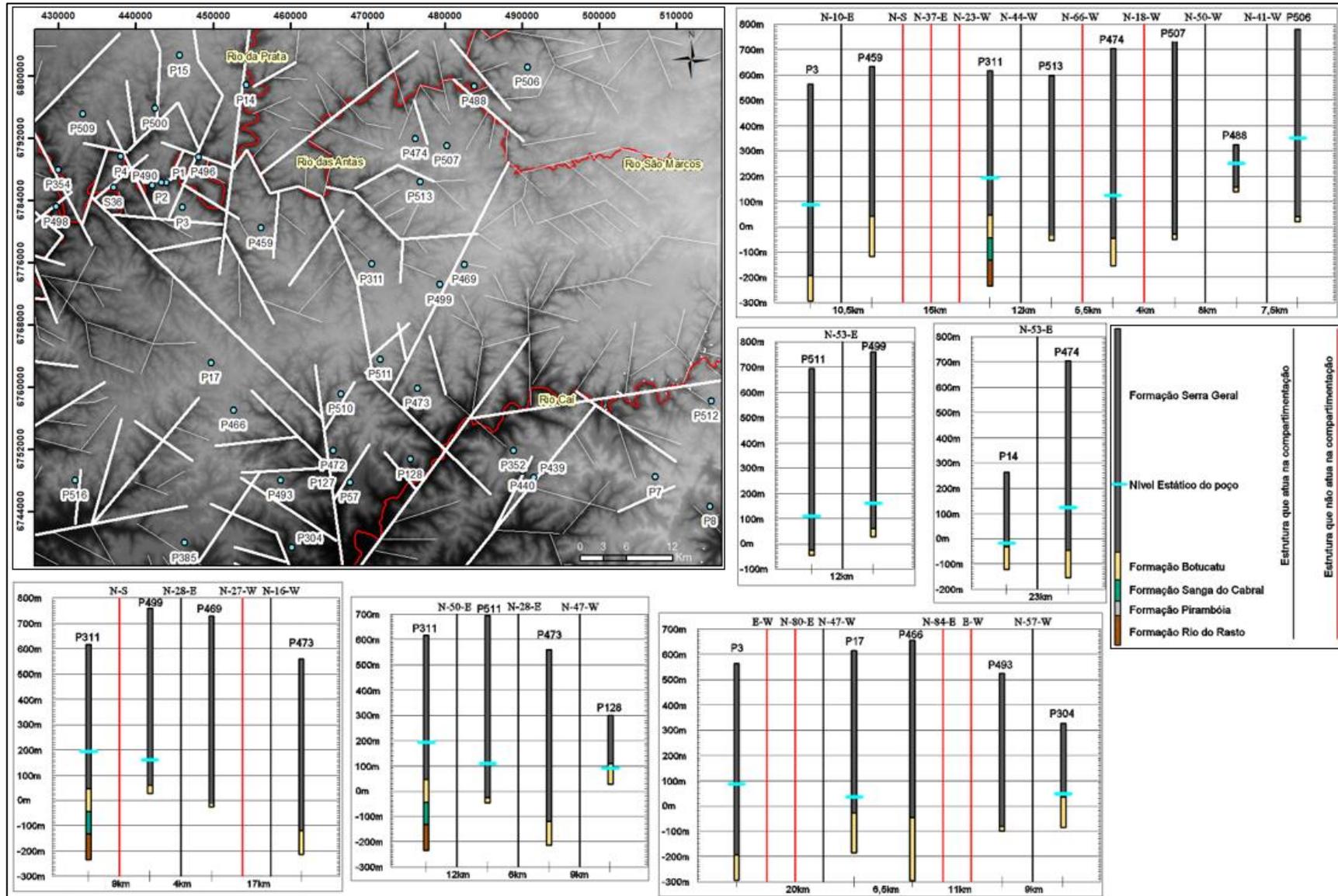
Entre P311 e o conjunto de poços (P474, P507 e P513), existem algumas estruturas que podem estar contribuindo para a formação desses blocos, com destaque para uma N44W. Foi observado entre essas áreas uma variação do topo do SAG de pelo menos 80 m, e na potenciometria de 70 m. Vale destacar que o topo do Aquífero Botucatu em P474 se encontra em cotas menores que a base deste aquífero em P311, estando posicionado lateralmente na mesma cota que a Unidade Hidroestratigráfica Sanga do Cabral, que também compõe o SAG.

No outro extremo, temos a atuação da estrutura N50W encaixada no Vale do Rio São Marcos, e que proporciona uma grande variação no topo do SAG e na potenciometria entre P474 e P488, de 203 m e 128 m, respectivamente. Nessa mesma área foi identificada a estrutura N41W, que atua entre P488 e P506, influenciando tanto na variação do topo do SAG de 120 m, quanto na potenciometria, onde foi verificada uma diferença de 96 m.

Mesmo essa região se alternando em diferentes blocos, se levarmos em consideração a potenciometria, em todos eles os valores encontrados são acima de 100 m.s.n.m. Baseado nessa informação, e avaliando os poços P14 e P474, foi possível definir que a estrutura N53E, encaixada no Vale do Rio das Antas, atua sobre o SAG, proporcionando uma compartimentação entre esses blocos da área na porção leste, com relação ao bloco formado pelos poços P14 e P504, com uma diferença na potenciometria, neste caso, de 141 m.

Da região onde se localiza P3, em direção as escarpas, verificou-se a existência de três blocos. No bloco mais ao norte temos a área de P3, caracterizada por apresentar um topo do SAG em cotas bem baixas. No bloco central temos os poços P17, P466 e P493, com cotas do topo de -28, -47 e -79 m.s.n.m., respectivamente, indicando uma pequena variação entre os dois primeiros, e uma variação um pouco maior entre os dois últimos, que ocorre por conta da atuação de duas estruturas existente entre eles, uma E-W e outra N84E. Já ao sul temos o bloco onde está localizado o poço P304, que possui uma cota mais elevada, de 38 m.s.n.m.

Figura 100 - Perfis representativos da região central da área de estudo.



Dentre as estruturas responsáveis pela formação desses blocos, destacam-se duas NW, uma N47W entre os poços P3 e P17, que possui mais de 40 km, e outra menor ao sul, N57W, que provavelmente é a responsável pelo limite dos blocos entre P493 e P304.

Da região central em direção as escarpas temos uma forte atuação estrutural, que é responsável pela grande variação do topo do SAG. Entre os poços P128 e P473 verificou-se uma variação de 229 m no topo do SAG, que ocorre por atuação da estrutura N47W. Já entre as áreas dos poços P473 e P511, uma estrutura N28E de mais de 30 km proporciona uma variação de 95 m no topo do SAG. Entre os poços P311 e P511 foi identificada uma estrutura na escala 1:250.000, de orientação N50E, próxima ao SFDC, e que pode ser a responsável pela variação de 72 m no topo do SAG, e de 85 m na potenciometria.

A estrutura N28E verificada no caso anterior, também atua sobre o topo do SAG nas áreas entre P469 e P499, mas de uma maneira mais suave, com variação de 70 m. Destaca-se também uma estrutura N13W que separa as áreas entre P499 e P511, proporcionando uma variação no topo do SAG e na potenciometria de 85 m e 50 m, respectivamente.

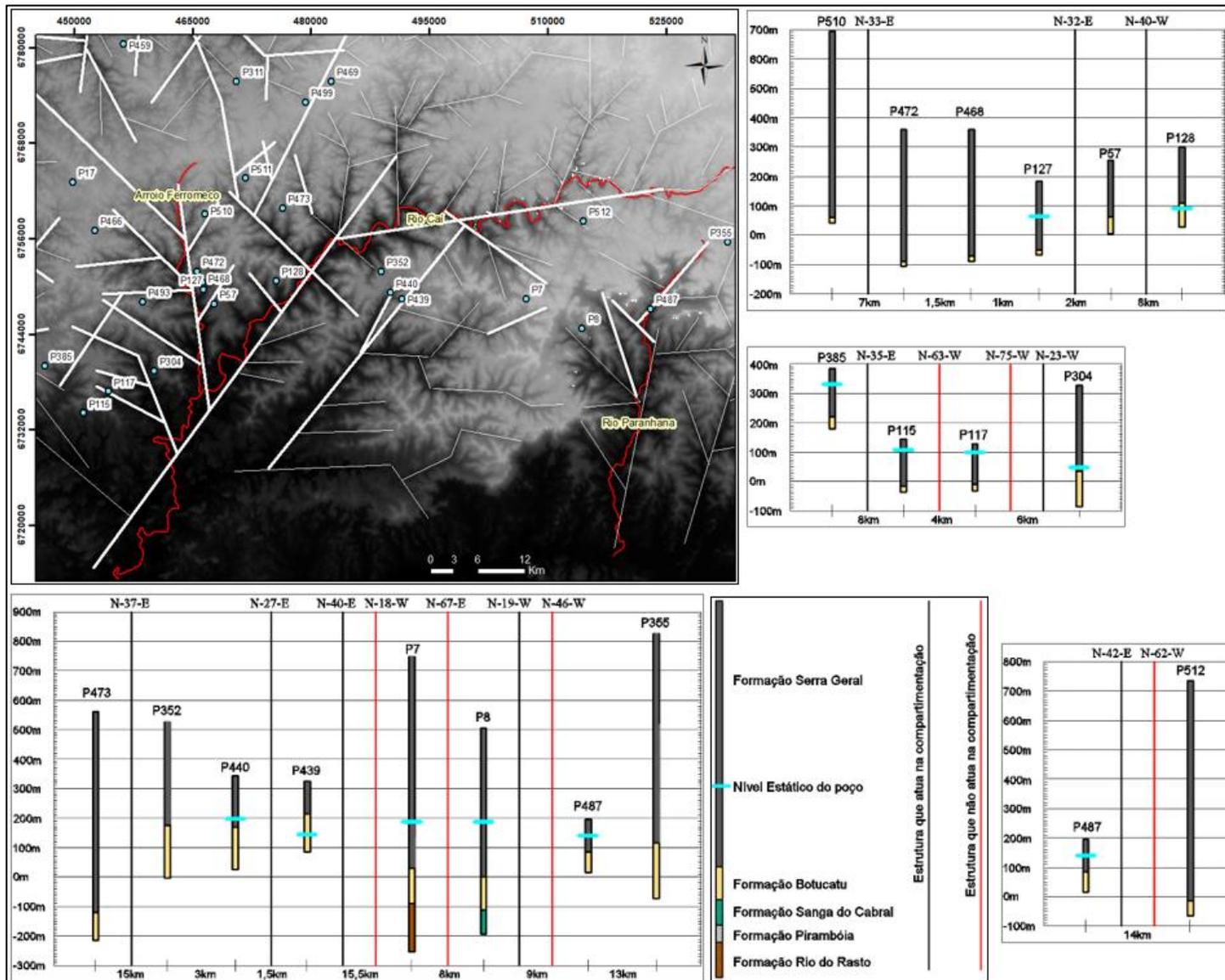
Verificou-se entre as áreas dos poços P469 e P473 uma variação do topo do SAG de 110 m. Essa diferença ocorre provavelmente pela influência da estrutura N16W próxima de P473, apesar de uma outra estrutura NW também estar presente entre essas áreas.

A região sul corresponde a área de transição entre o planalto e as escarpas, onde foi observada a presença de várias grandes estruturas que atuam sobre o SAG, especialmente aquelas que se encontram encaixadas nos principais vales da região (Figura 101).

Nessa região temos que a estrutura N23W proporciona uma variação no topo do SAG e na potenciometria entre P117 e P304, de 49 m e 50 m, respectivamente. Nesta mesma área, verificou-se a formação de um bloco alto em P385, evidenciado pela grande variação existente tanto no topo do SAG, quanto na potenciometria, quando relacionada com o poço P115, com uma diferença de 237m e 225m, respectivamente. Entre essas áreas temos a presença de uma estrutura de 14 km, com orientação N35E.

Na área do Arroio Ferromeco verificou-se uma grande alternância no topo do SAG entre P57, o conjunto de poços P127, P468 e P472, e P510. Apesar dessa variação, entre o conjunto de poços e P57, não foram verificadas estruturas que tivessem sido identificadas na escala de 1:1.000.000. Mas ao avaliar o traçado elaborado para a escala 1:250.000, foi identificada uma estrutura N32E que pode estar atuando na movimentação do topo entre essas áreas, proporcionando variações de 115 m. Isso demonstra que as avaliações em escalas de maior detalhe também podem contribuir na identificação de blocos. Já entre conjunto de poços e P510, temos a estrutura N33E como responsável pela variação do topo de 151 m.

Figura 101 - Perfis representativos da região sul da área de estudo.



Assim como ocorreu em outros casos, neste local também não foram identificadas estruturas baseadas no traçado de lineamentos de 1:1.000.000, apenas para os traçados da escala 1:250.000. A estrutura N27E entre P440 e P439 apresenta uma atuação, tanto na variação da cota do topo do SAG, de 45 m, quanto na variação da potenciometria, de 56 m.

Além disso, a potenciometria indica características diferentes do nível da água entre as duas áreas, com o nível posicionado bem abaixo do topo do SAG em P439, e acima do topo em P440. Isso sugere que esta estrutura possa estar contribuindo para a individualização de blocos. Vale ressaltar que no levantamento feito em campo verificou-se ao sul de P440 a presença de arenitos silicificados na cota 156 m.s.n.m. (Ponto 8), indicando que o contato estaria em uma cota próxima.

A partir das informações dos poços P352 e P473, foi possível avaliar a grande importância que a estrutura N37E de 65 km, que está encaixada no Vale do Rio Caí, tem sobre as características do SAG. Verificou-se que ela é responsável por uma grande variação no topo do SAG entre essas áreas, de 297 m. Vale destacar o fato de que esta mesma estrutura também atua na compartimentação do SAG na Área da Escarpa.

Paralela a essa grande estrutura, verificou-se a existência de uma N40E de 40 km, que atua diretamente sobre o aquífero entre os poços P7 e P439, e proporciona uma grande variação no topo do SAG, de 184 m, e na potenciometria, de 43 m.

Nessa região da borda sul da área de estudo foram identificadas duas estruturas NW, com destaque para a primeira, de orientação N19W, próxima do poço P8, que surge como principal candidata para as variações do topo do SAG e da potenciometria entre as áreas deste poço e de P487, de 85 m e 47 m, respectivamente. Pelo posicionamento dessas duas áreas, separadas por um vale, é possível que tenhamos neste caso dois blocos com características distintas, um mais baixo em P8, e outro mais alto em P487.

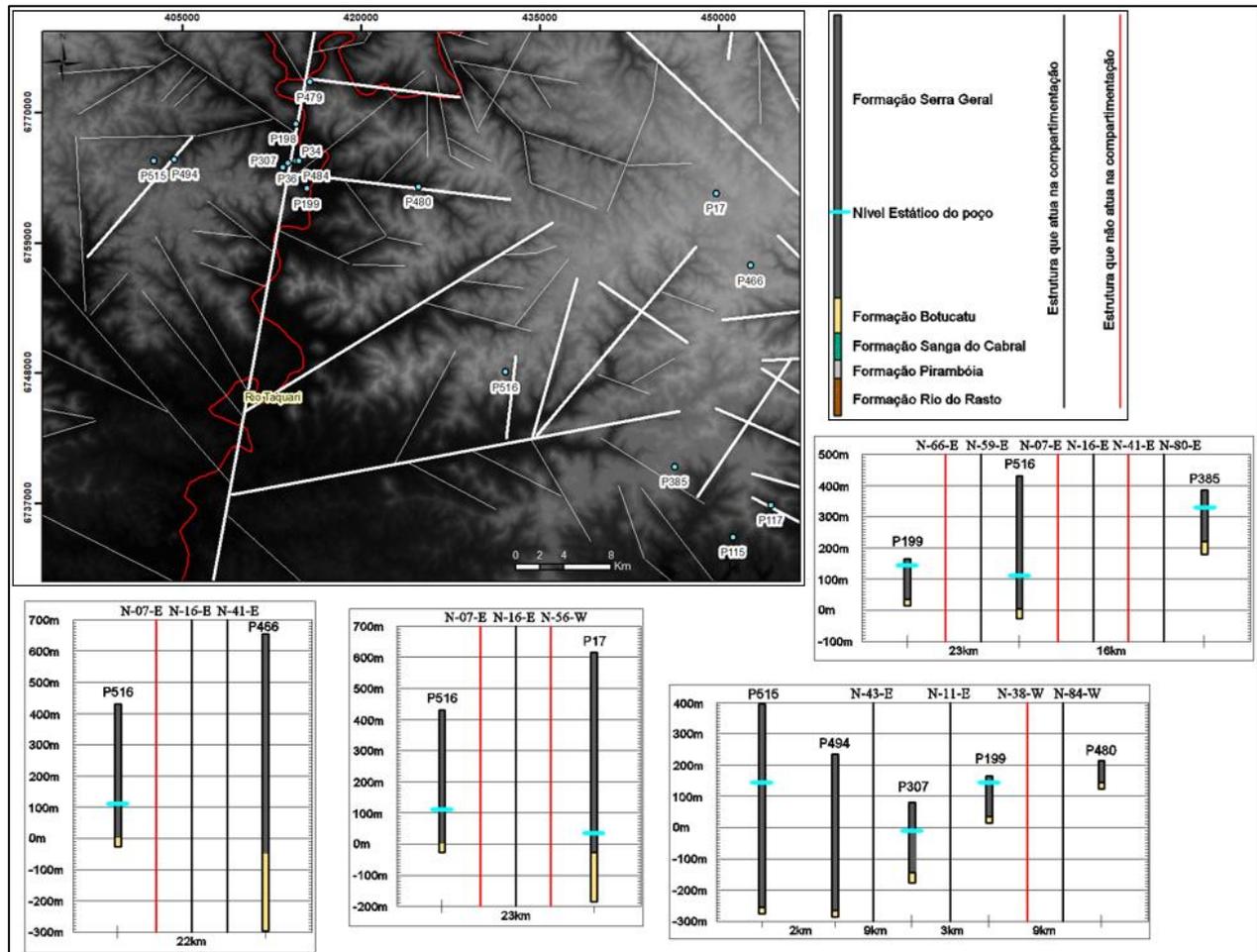
Próxima dessa área, foi observada a presença da estrutura N42E, que separa os poços P355 e P487, do poço P512, e atua diretamente sobre o topo do SAG. Utilizando como exemplo o poço P487, temos uma diferença no topo de 100 m.

Na região do Vale do Rio Taquari temos uma tendência das cotas do topo do SAG decrescendo das regiões mais elevadas da porção central da área de estudo, em direção ao vale. Porém, a partir da calha do rio em direção a oeste, as cotas continuam diminuindo, mesmo em áreas mais elevadas. Com relação a potenciometria, temos a tendência de redução da mesma em direção ao vale, tanto da área a oeste quanto da área central (Figura 102).

Nessa área temos a atuação de algumas estruturas, com destaque para a N11E encaixada no Vale do Rio Taquari. Além desta, temos uma N84W e uma N59E, que separam as áreas

P199 e P480, e P199 e P516, respectivamente. No primeiro caso, temos uma variação de 115 m no topo do SAG, enquanto no segundo, essa variação foi de 71 m, além da diferença de 69 m na potenciometria. Outra estrutura é a N43E que separa os poços P494 e P515, do conjunto localizado próximo ao rio. Ao relacionar esses dois poços com o P307, verificou-se uma diferença de 123 m no topo do SAG, e de 152 m na potenciometria.

Figura 102 - Perfis representativos da região do Vale do Rio Taquari.



Ao relacionar o poço P516 com P17, P456 e P385, foram identificadas algumas estruturas que atuam na compartimentação da área, com as N16E, N41E e N80E, que proporcionam uma grande variação tanto no topo do SAG, quanto na potenciometria.

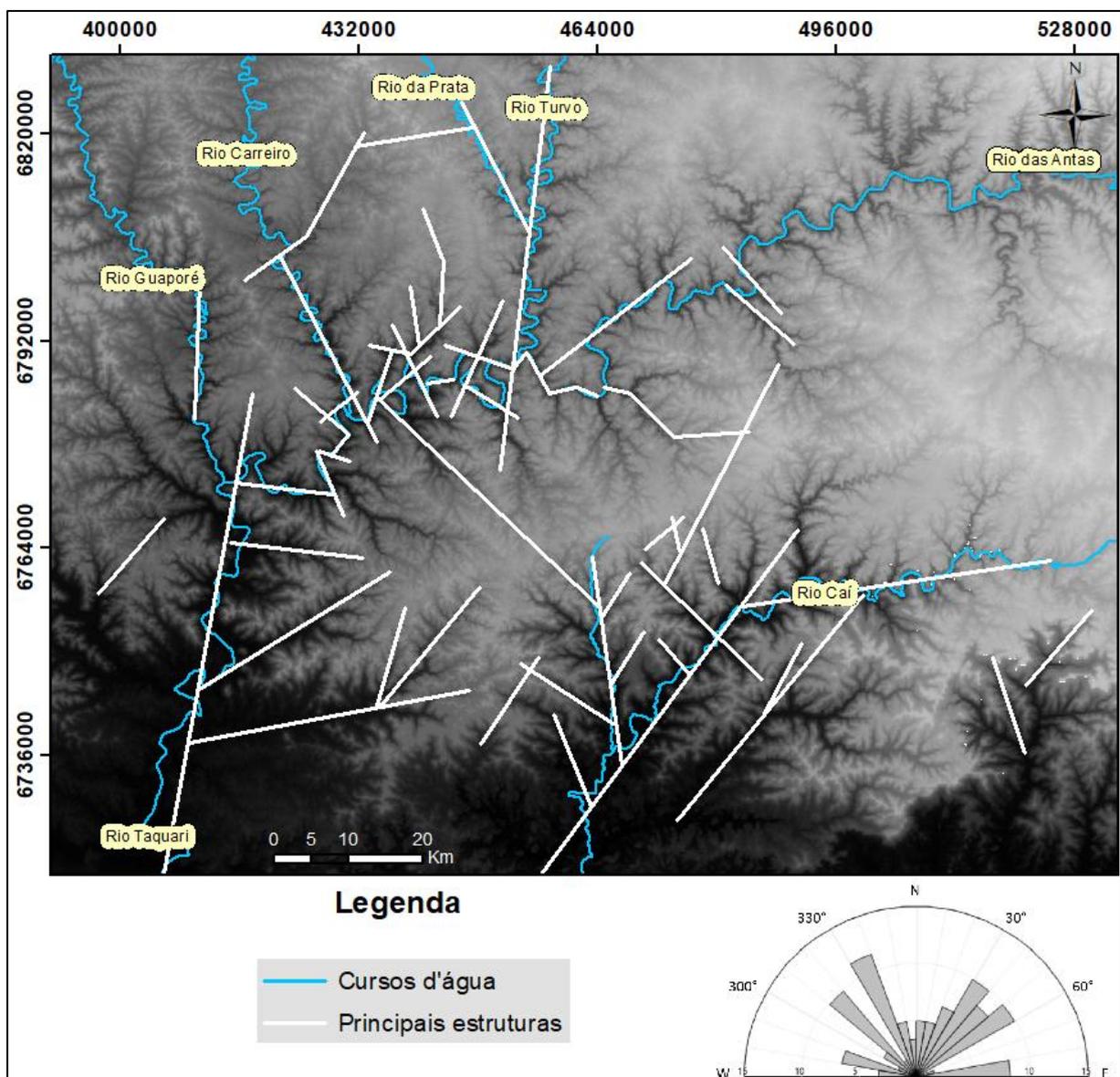
5.3.5.5. Arcabouço estrutural do SAG na Área do Planalto

A definição do arcabouço estrutural levou em consideração as estruturas identificadas nas escalas locais e regionais, e de que forma elas atuam sobre o SAG. Foi utilizado como

fator preponderante as variações do topo do SAG, com as demais informações sendo utilizadas de forma complementar.

Com base nessas informações foi possível verificar que a atuação destas estruturas é responsável pela movimentação de blocos que, em alguns casos são tão intensos a ponto de influenciar na variação da potenciometria entre as áreas, com essas características ocorrendo tanto em escala regional, quanto local. Na Figura 103 são apresentadas as principais estruturas que atuam na compartimentação do SAG na área de estudo.

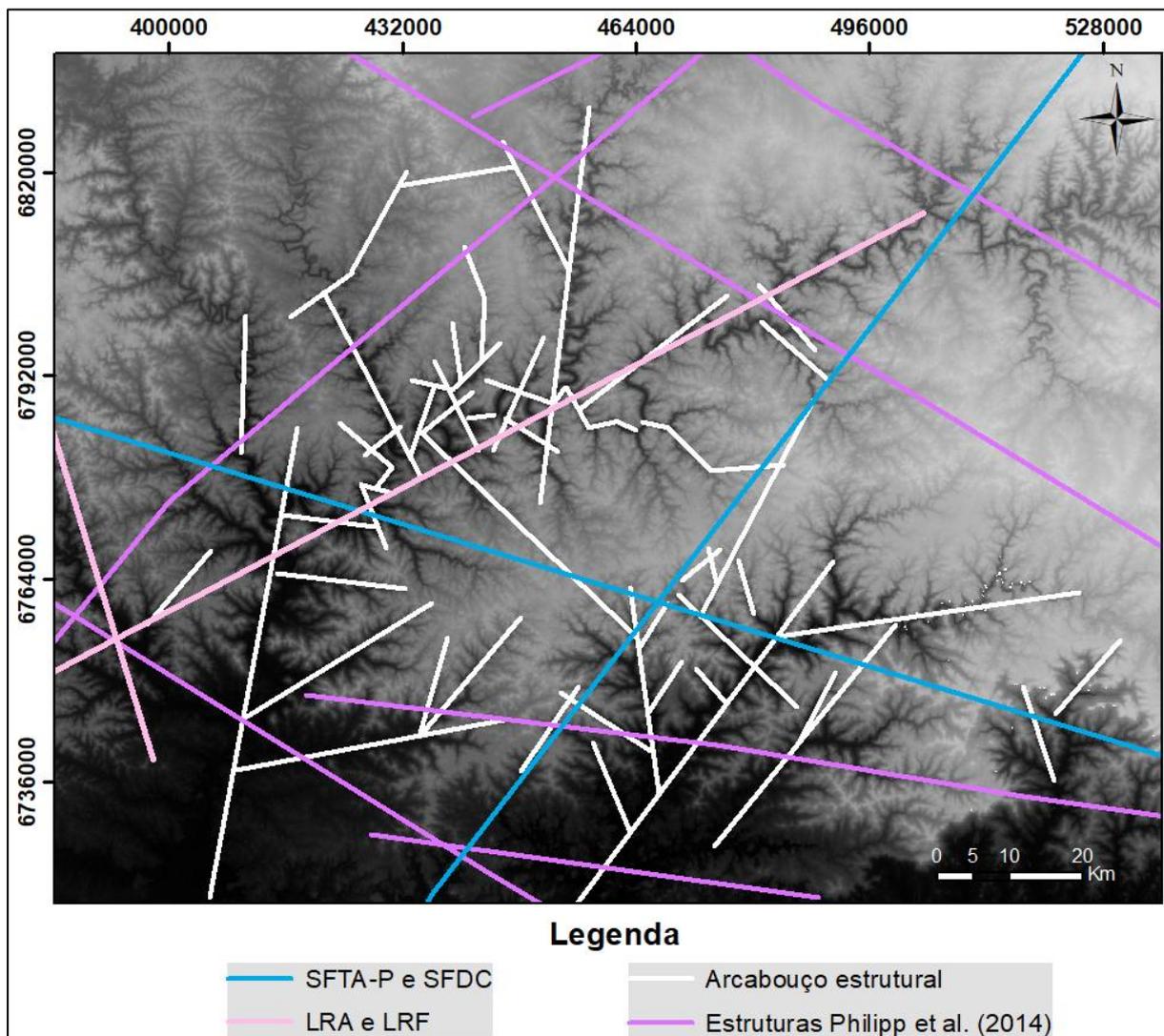
Figura 103 - Principais estruturas que atuam na compartimentação SAG na Área do Planalto.



Analisando as principais estruturas que compartimentam o SAG verificou-se que elas apresentam, majoritariamente, um comprimento superior à 10 km, chegando a até 66 km. Boa

parte das estruturas menores se encontram na região dos vales, ou áreas adjacentes, e podem ser representação de partes de estruturas maiores, como é o caso do Lineamento Rio da Antas (LRA), de orientação N65E, e dos Sistema de Falhas Dorsal de Canguçu e Terra de Areia-Posadas, de orientações NE e NW, respectivamente (Figura 104).

Figura 104 - Relação entre o arcabouço estrutural e outras estruturas regionais.



Considerando apenas as estruturas que atuam na compartimentação do SAG, verificou-se que elas apresentam orientações principais N30W e N60E, e secundárias N50W, N40-50E e E-W. Vale destacar que estas orientações refletem as características dos alinhamentos principais do embasamento quanto as zonas de cisalhamento dúctil e sistemas de fraturamentos, citadas por Zalán et al. (1987), e verificadas em vários outros estudos na Bacia do Paraná.

Outro detalhe importante é o caráter regional de atuação das estruturas N11E e N37E, que se encontram nos vales do Rio Taquari e Rio Caí, respectivamente, visto que ambas também foram identificadas como compartimentadoras no estudo da Área da Escarpa, mostrando a continuidade da sua influência sobre o SAG ao longo de toda essa região.

5.3.6. Interações hidrogeológicas entre o SAG e o SASG

A definição de existência de interações entre as águas dos aquíferos se deu em função da ocorrência de três fatores distintos, a existência de uma potenciometria favorável, isto é, quando o nível potenciométrico do SAG se encontra elevado o suficiente nas rochas vulcânicas de modo a permitir o seu fluxo pelas fraturas, e dessa forma a interagir com as águas do SASG, a presença de indicadores hidroquímicos característicos das águas do SAG na região, identificados em etapas anteriores, em poços que captam água apenas do aquífero fraturado, e da existência de estruturas mapeadas na região que permitissem a conexão entre os dois aquíferos.

Vale ressaltar que a mistura de água entre esses dois sistemas, em função dessa interação, ocorre com diferentes proporções, o que influencia diretamente nos parâmetros físico-químicos dessas águas finais. Esse processo ocorre em função de vários fatores, como por exemplo as características físicas das fraturas, sua profundidade, quantidade e dimensões, tempo de residência dessa água, volume de contribuição de cada um dos aquíferos, e da variabilidade hidroquímica.

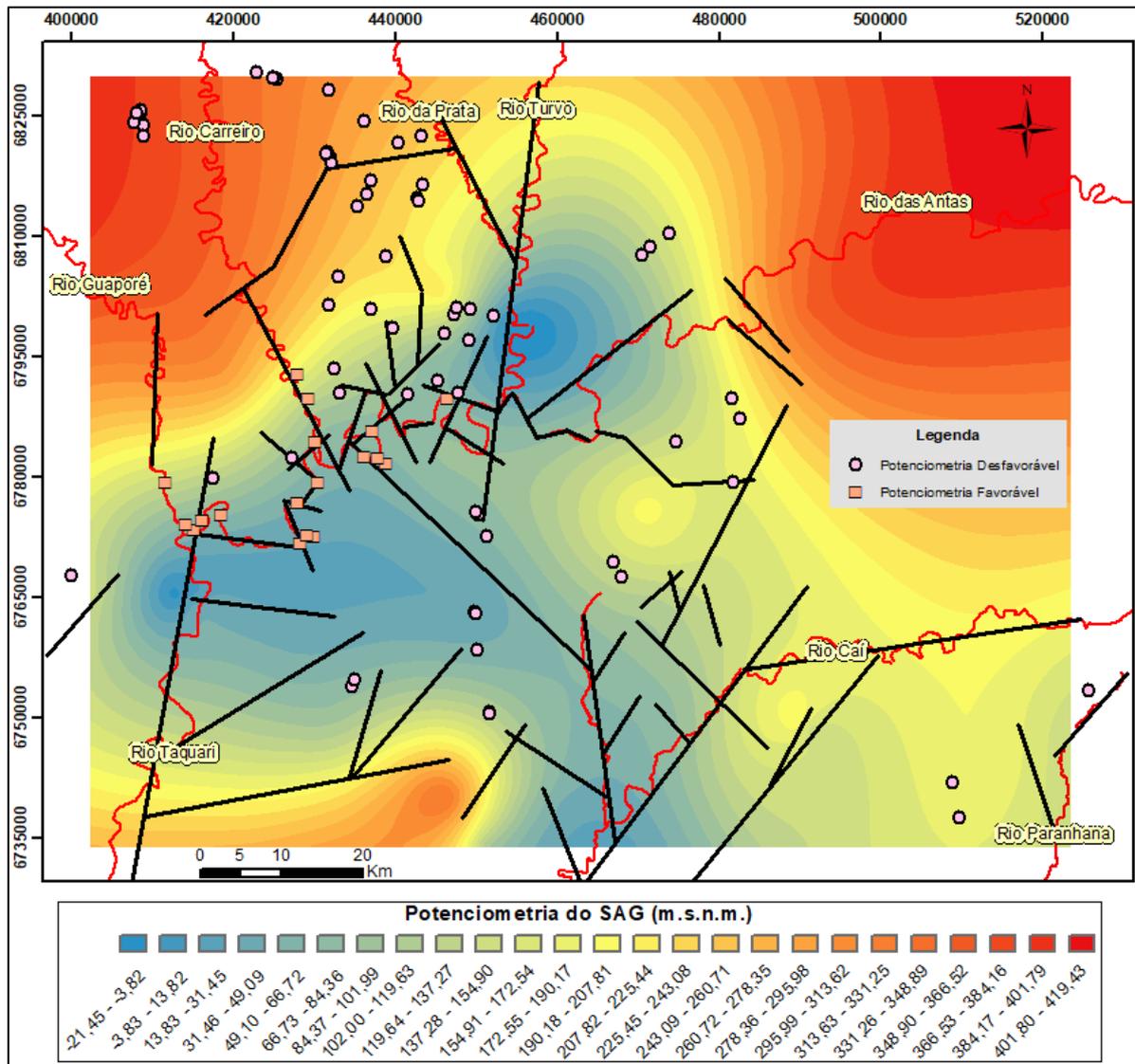
5.3.6.1. Avaliação da existência de potenciometria favorável do SAG sobre o SASG

Para a avaliação dos locais onde ocorre uma potenciometria favorável do SAG levou-se em consideração apenas os poços do SASG que possuem informações completas quanto a hidroquímica, bem como uma cota de referência, que leva em consideração a posição da entrada de água mais profunda, ou quando esta informação não esteve disponível, da cota potenciométrica daquele poço.

Para os casos específicos onde a cota de referência ficou um pouco acima da potenciometria do SAG, para a inclusão desses poços considerou-se a incerteza que existe quanto à distância entre os poços utilizados na interpolação do mapa potenciométrico. Dessa forma, verificou-se que dos 83 poços com informações disponíveis, 18 possuem uma cota de

referência abaixo da potencimetria do SAG, estando estes destacados em quadrados alaranjados no mapa (Figura 105).

Figura 105 - Distribuição dos poços do SASG sob potencimetria favorável do SAG, com destaque para as estruturas que atuam na compartimentação do SAG.

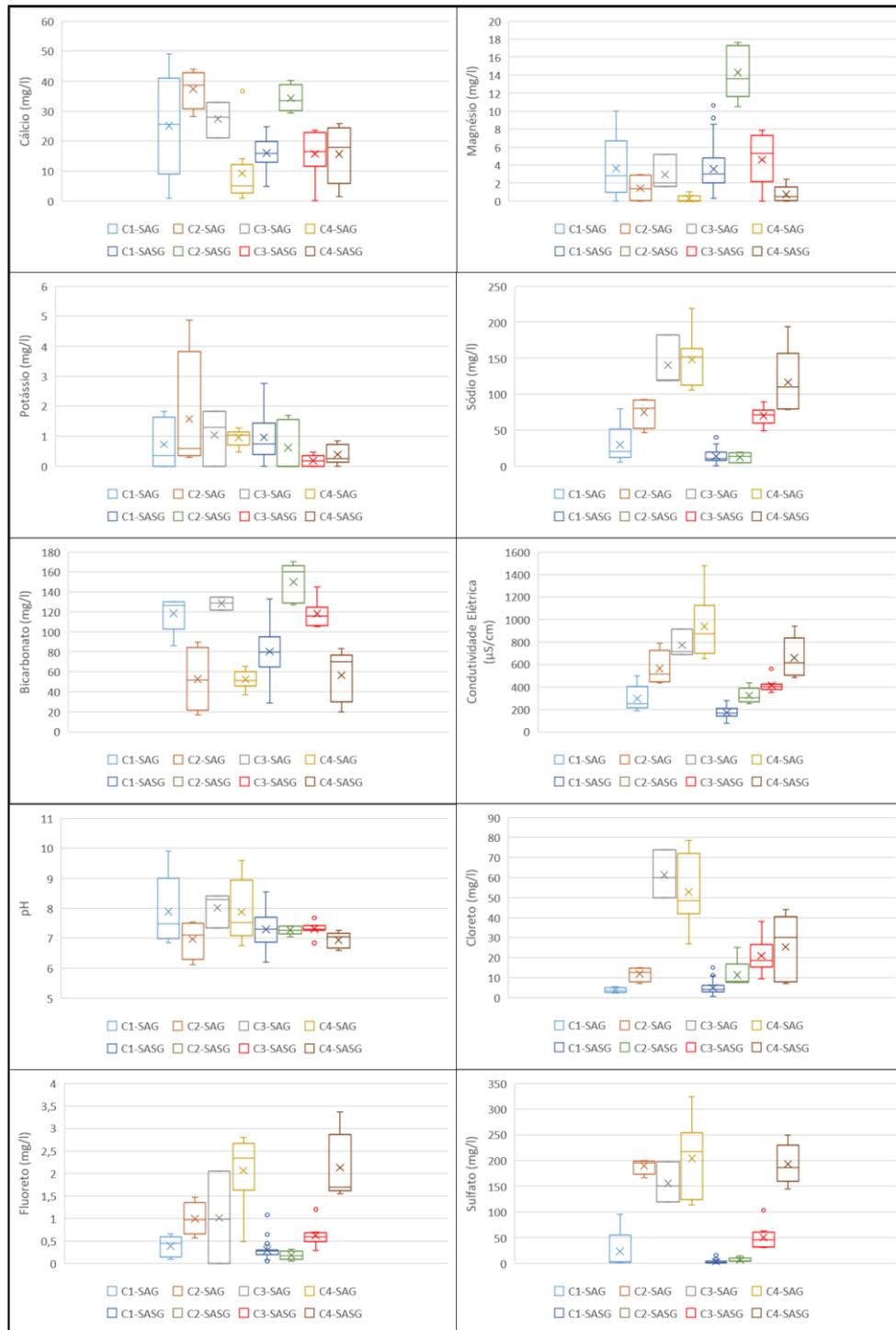


Verificou-se que todos os poços que possuem potencimetria favorável estão distribuídos ao longo dos vales do Rio das Antas, Rio Carreiro e Rio Guaporé. Se levarmos em conta que as potencimetrias do SAG na área de estudo dificilmente superam as cotas de 300 m.s.n.m., é coerente que a possibilidade de conexão entre os sistemas aquíferos seja muito pequena nas áreas distantes dos vales, no alto dos morros, visto que por sua grande elevação seriam necessários poços muito profundos para se atingir o patamar em que se encontra a potencimetria do SAG, e mesmo assim, dificilmente existiriam fraturas produtoras que permitisse essa conexão.

5.3.6.2. Análise da similaridade entre as águas do SAG e do SASG

Utilizando como base as características hidroquímicas individualizadas nos agrupamentos definidos para cada um dos sistemas aquíferos, foi realizada uma avaliação para os principais parâmetros físico-químicos, de modo a verificar similaridades entre os conjuntos, o que poderia representar a existência de interações entre as águas (Figura 106).

Figura 106 - Relação entre os principais parâmetros físico-químicos e os agrupamentos.



Verificou-se que as águas do grupo C1-SAG possuem certa similaridade com os grupos C1-SASG e C2-SASG. Esses grupos representam águas menos mineralizadas, características do SASG, e do SAG livre, ou de baixo confinamento.

O grupo C3-SASG possui similaridade com os grupos C2-SAG e C3-SAG. Apesar das concentrações de sulfato não serem tão elevadas, levando em consideração os dois grupos de poços do SAG, verificou-se patamares parecidos aos de C3-SASG para sódio, cloreto, fluoreto e bicarbonato. Assim como para o sulfato, os valores de condutividade elétrica também foram menores, o que pode ter relação, como citado anteriormente, com o efeito da contribuição das águas mais recentes do SASG para a formação dessas misturas.

Com relação aos grupos C4-SAG e C4-SASG, as informações hidroquímicas mostram águas muito parecidas, com os valores referentes aos principais parâmetros indicativos de interações posicionados em patamares muito próximos.

Baseado nessas informações, verificou-se que existem uma alta probabilidade da ocorrência de interações das águas do SAG nos poços pertencentes aos grupos C3-SASG e C4-SASG. A presença nas águas do SASG dos marcadores do SAG na região como o sódio, o cloreto, o fluoreto, o sulfato e a condutividade elétrica, se mostram coerentes com o verificado por outros autores que identificaram esse processo na Bacia do Paraná, como Bittencourt et al. (2003), Gastmans (2007) e Athayde et al. (2014).

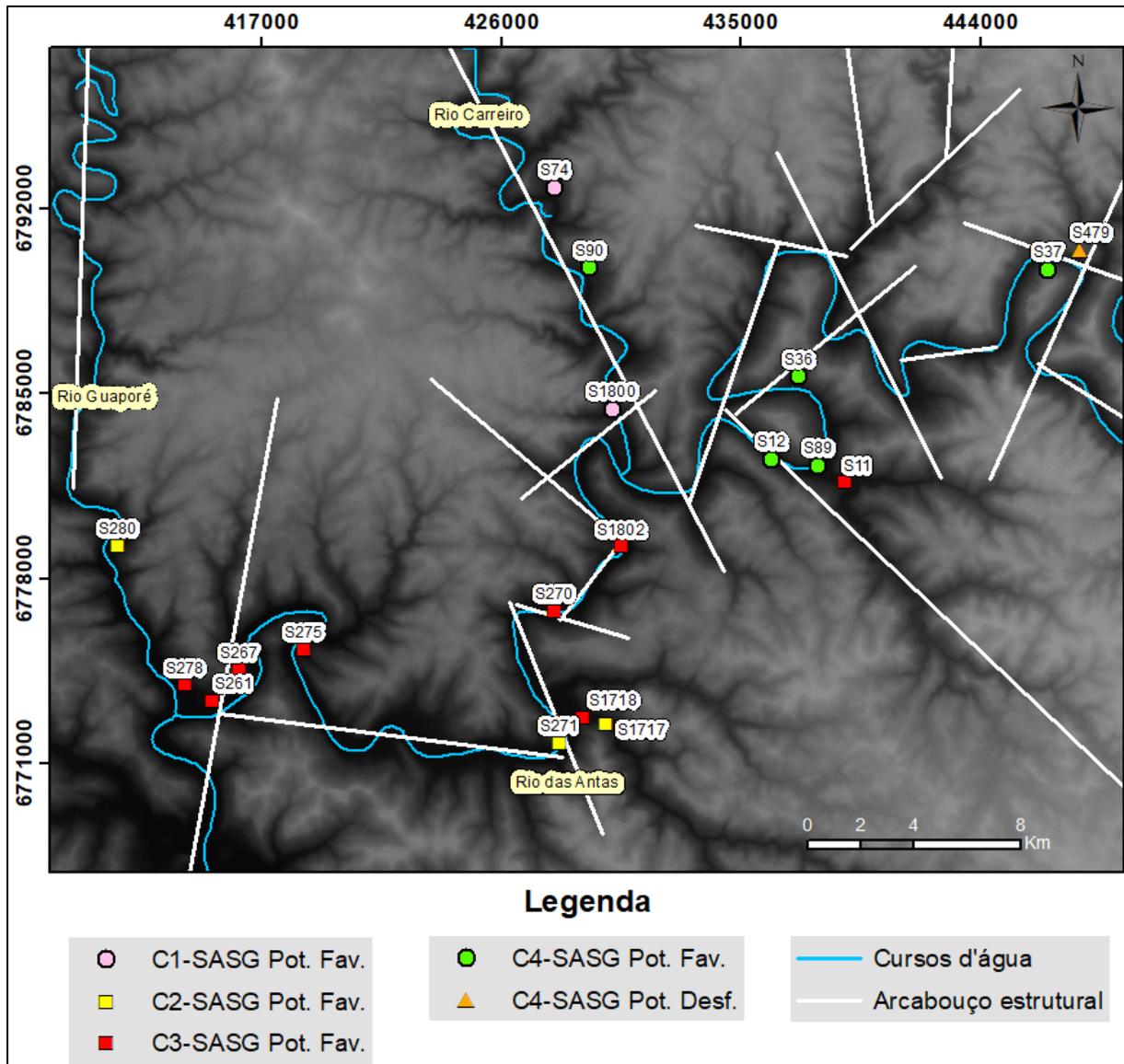
Para os outros dois grupos, C1-SASG e C2-SASG, as características hidroquímicas dificultam a determinação da existência de interações, visto que por apresentar águas menos mineralizadas seria improvável a observação de algum marcador relacionado as águas do SAG, principalmente para o primeiro grupo. O grupo C2-SASG, apesar de apresentar condutividades elétricas mais elevadas, possui águas com predominância dos cátions cálcio e magnésio sobre o sódio, além de baixos valores de sulfato.

5.3.6.3. Ocorrência de interações entre as águas do SAG e do SASG

Para confirmar a ocorrência de interações, utilizou-se como base os grupos de águas C3-SASG e C4-SASG, por este apresentarem um maior grau de similaridade com as águas do SAG para a região. Dessa forma, verificou-se que dos 14 poços enquadrados nesses dois grupos, apenas um não se encontra sob potenciometria favorável, o S479 (Figura 107). Apesar disso, neste caso é provável que exista alguma outra entrada de água mais profunda e que tenha passada despercebida pelo operador na realização do registro das informações, visto que os 410 m de profundidade do poço posicionam a sua base na cota -93 m.s.n.m., bem abaixo da

potenciometria do SAG neste local (70 m.s.n.m.). Levando em consideração essa possibilidade, o número total de poços com potenciometria favorável na área passa para 19.

Figura 107 - Distribuição dos poços com potenciometria favorável e do poço S479.



Foi observada a existência de dois poços pertencentes ao grupo C1-SASG, S74 e S1800, onde foi identificada uma potenciometria favorável. Verificou-se que nesses poços, os valores para o sódio, sulfato e condutividade elétrica, estão entre os mais elevados deste grupo, apresentando uma proporção rCa/rNa próxima de 1. Além disso, o poço S74 possui duas entradas de águas, uma mais superficial com cota 146 m.s.n.m, e outra mais profunda na cota 48 m.s.n.m, enquanto que o poço S1800 não possui informação quanto as entradas de água, com sua cota de referência posicionada a apenas 9 m de profundidade. Esses indícios sugerem

que estes poços provavelmente possuem interações com as águas do SAG, mas a atuação da contribuição das entradas de águas mais superficiais tendeu a atenuar significativamente a influência do SAG. Por conta dessa situação particular, apesar da existência de interações nesses dois poços, os mesmos não serão utilizados nas análises posteriores.

Os outros dois poços que possuem potenciometria favorável, S271 e S1717, foram classificadas como pertencentes ao grupo C2-SASG. Estes poços estão localizados próximos um do outro, e possuem uma hidroquímica muito similar. Em S271 não existe informação quanto a entradas de água, sendo a sua cota de referência estimada a partir do seu nível estático, que se localiza a apenas 16 m abaixo do terreno. Já no poço P1717 foram identificadas três entradas de água, com cotas 50, 38 e 9 m.s.n.m. Nestes casos, não existe indícios suficientes para sugerir a existência de interações entre as águas. Essas águas possuem uma forte relação com o cálcio e o magnésio, diferentemente do que foi verificado para as águas do SAG.

O poço S280, que também pertencente ao grupo C2-SASG, é um caso particular. A hidroquímica desse poço possui as maiores concentrações de bicarbonato dentre todos os poços do SASG (170 mg/l), além de condutividade elétricas (432 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e cloreto (25 mg/l), elevados, similares às encontradas nos poços próximos onde existem interações com o SAG, porém com baixas concentrações de sódio, fluoreto e sulfato. Por este ser um poço pouco profundo (85 m), sem informação quanto o posicionamento das entradas de água, surgem duas possibilidades para a hidroquímica encontrada, a existência de interações com águas do SAG com características de áreas de baixo confinamento, ou a mais provável, contaminação por fonte antrópica, visto que este poço se localiza no meio de uma plantação, o que explicaria o valor mais elevado do cloreto.

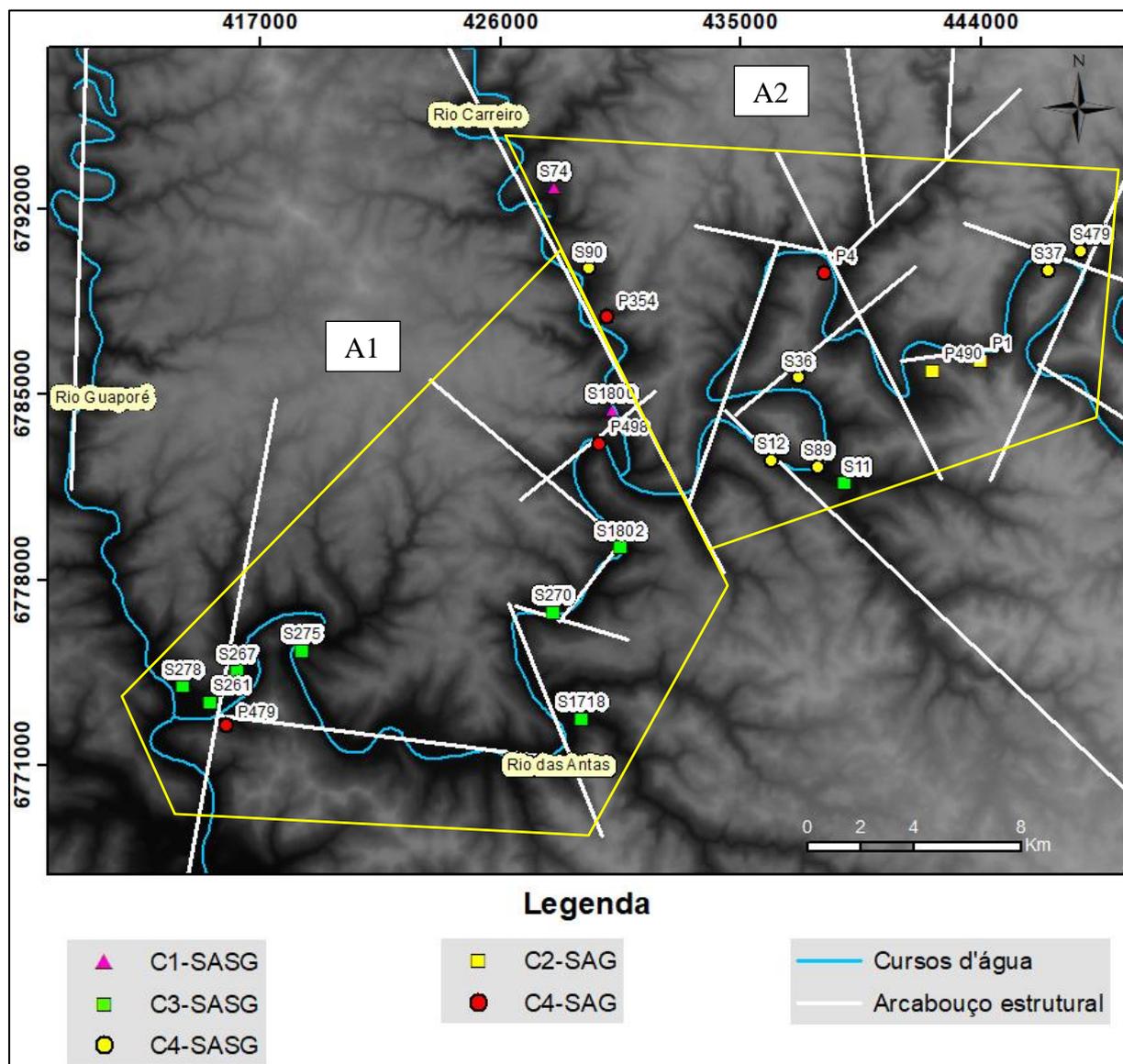
Apesar do foco do estudo ser a interação entre as águas do SAG e do SASG, vale destacar o fato levantado anteriormente na caracterização hidroquímica quanto a presença nesses aquíferos de concentrações elevadas de elementos como o sulfato, cloreto, fluoreto e sódio, que poderiam ser originárias de fontes mais basais que o SAG. Levando em consideração a grande quantidade de estruturas compartimentadoras, que podem ter relação com as estruturas regionais identificadas por diferentes autores na área, é possível que parte dessas estruturas estejam permitindo a conexão com aquíferos mais profundos.

Esse processo se evidencia ainda mais se levarmos em conta o estudo realizado por Teixeira e Viero (2017), que sugerem uma origem na Formação Irati para os valores elevados de sódio, sulfato, cloreto e fluoreto. Essa Formação também foi citada por Kern et al. (2008) e Marimon et al. (2013), como a provável origem do fluoreto nas águas do SAG.

Isso indica que a água do SAG, que proporciona uma recarga ascendente no SASG, causando a interação entre elas, é formada por uma mistura da água originária deste aquífero com outra proveniente do pré-SAG, provavelmente da Formação Irati, através de estruturas que seccionam todos esses pacotes de rochas e permitam essa conexão.

Com a definição dos poços onde está ocorrendo a interação entre as águas do SAG e do SASG, verificou-se que a sua distribuição ao longo da área de estudo proporcionou uma separação em dois conjuntos de poços, indicando processos de misturas distintos entre essas áreas (Figura 108).

Figura 108 - Distribuição dos locais onde ocorre a interação entre as águas, com as áreas de separação dos dois conjuntos de poços.



Na primeira área, no Vale do Rio das Antas, no trecho entre as grandes estruturas encaixadas nos vales do Rio Taquari e do Rio Carreiro, temos as águas classificadas como pertencentes ao grupo C3-SASG, formado por águas sódicas, com concentrações elevadas de bicarbonato e sulfato, com o fluoreto menor que o VMP, e com condutividades elétricas que variam de 373 à 560 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As características encontradas nesse conjunto mostram que mesmo ocorrendo o processo de misturas com as águas do SAG, não foram observados parâmetros em patamares preocupantes, que poderiam causar problemas à saúde da população.

A segunda área, localizada a direita do Lineamento Rio Carreiro, possui poços classificados majoritariamente como sendo do grupo C4-SASG. Diferentemente do caso anterior, os poços dessa área possuem uma hidroquímica caracterizada por valores elevados de sódio, sulfato, fluoreto e condutividade elétrica, com casos que excedem o limite do VMP. Isso mostra a necessidade de uma avaliação criteriosa das características hidroquímicas dessas águas antes do seu consumo, o que poderia evitar problemas de saúde no futuro.

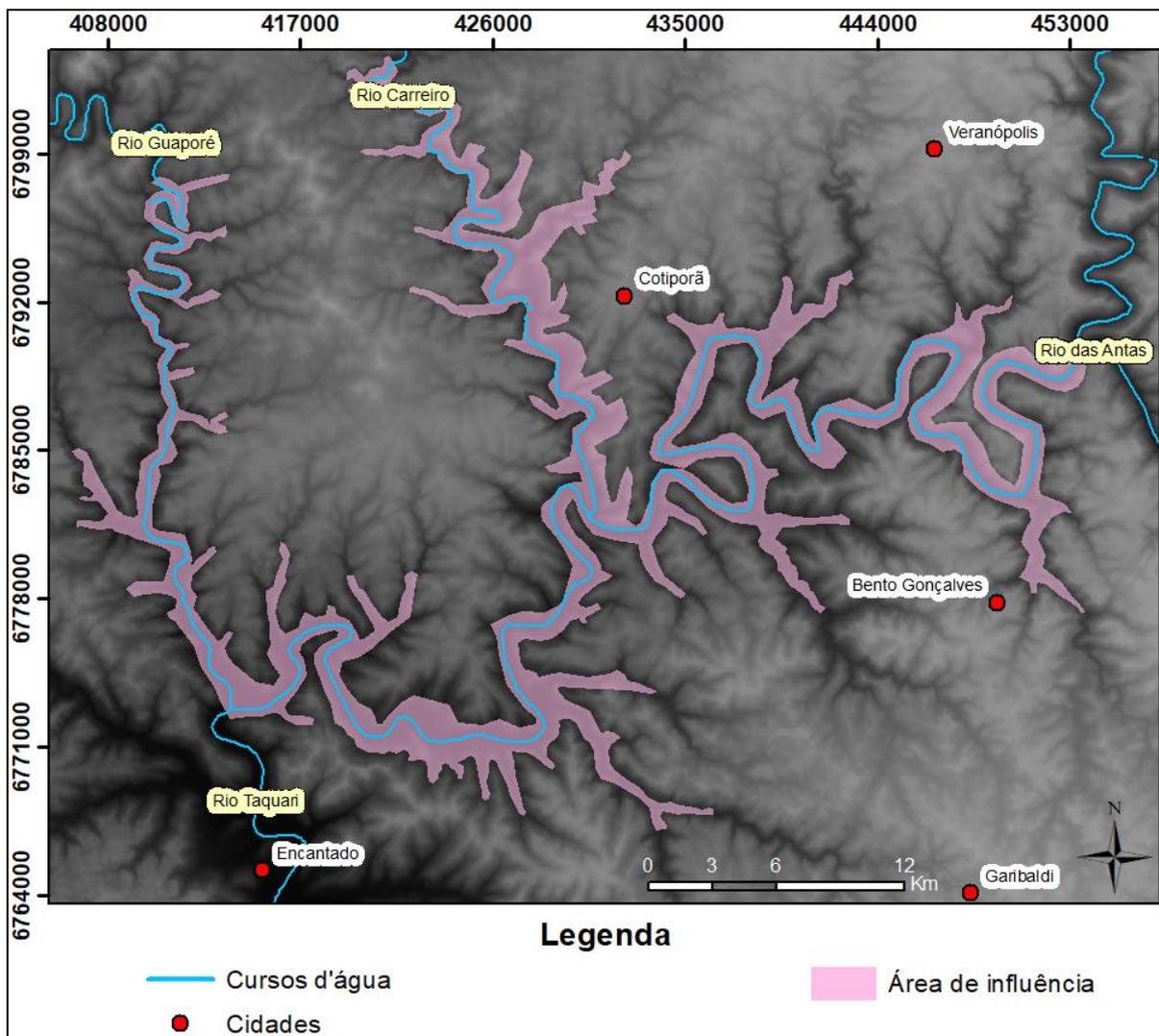
O fato de que os poços do SAG existentes próximo desses dois conjuntos pertencem ao grupo C4-SAG, indicam uma mesma fonte para as águas do SAG que contribuem para esta interação, com a diferenciação entre esses dois conjuntos ocorrendo em função da variabilidade das características físicas do aquífero fraturado. Além disso, vale destacar que a potenciometria do SAG na região próxima aos vales dos Rio das Antas e Rio Carreiro está posicionada em cotas equivalentes aos níveis dos rios correspondentes. Isso indica que este patamar de valores, próximo aos níveis dos rios, poderia funcionar como uma cota de referência para a ocorrência de interações, onde as entradas de água em poços do SASG abaixo desse limiar estariam sob potenciometria favorável do SAG. Outro detalhe importante é que os dois poços do grupo C2-SAG próximo ao Rio das Antas possuem contribuição no interior do poço de água proveniente das fraturas, não sendo dessa forma representativo para o SAG nessa área.

Levando em consideração todas as características que proporcionam a ocorrência de interações entre as águas dos aquíferos, foi possível elaborar um mapa com as áreas passíveis de ocorrência desse processo, com o foco nos vales onde foi observada a existência de interações (Figura 109). Para tanto, foram utilizadas as informações das profundidades das entradas de água dos poços do SASG, da potenciometria do SAG, e do nível da água dos rios.

A área de influência delimitada está distribuída ao longo dos vales e nas partes mais baixas das encostas dos morros adjacentes. Levando em consideração o traçado do rio, verificou-se que essa área de influência possui uma largura variável, bem como uma

assimetria com relação a cada uma das suas margens, possivelmente por conta das características geomorfológicas distintas em cada área. Vale destacar a ausência dessa área no alto dos morros, o que se mostra coerente, visto que nessas regiões mais altas seriam necessárias grandes perfurações para que um poço do SASG atingisse o patamar onde se encontra o nível do SAG, o que diminui consideravelmente a possibilidade da presença de estruturas abertas que proporcionassem essa conexão.

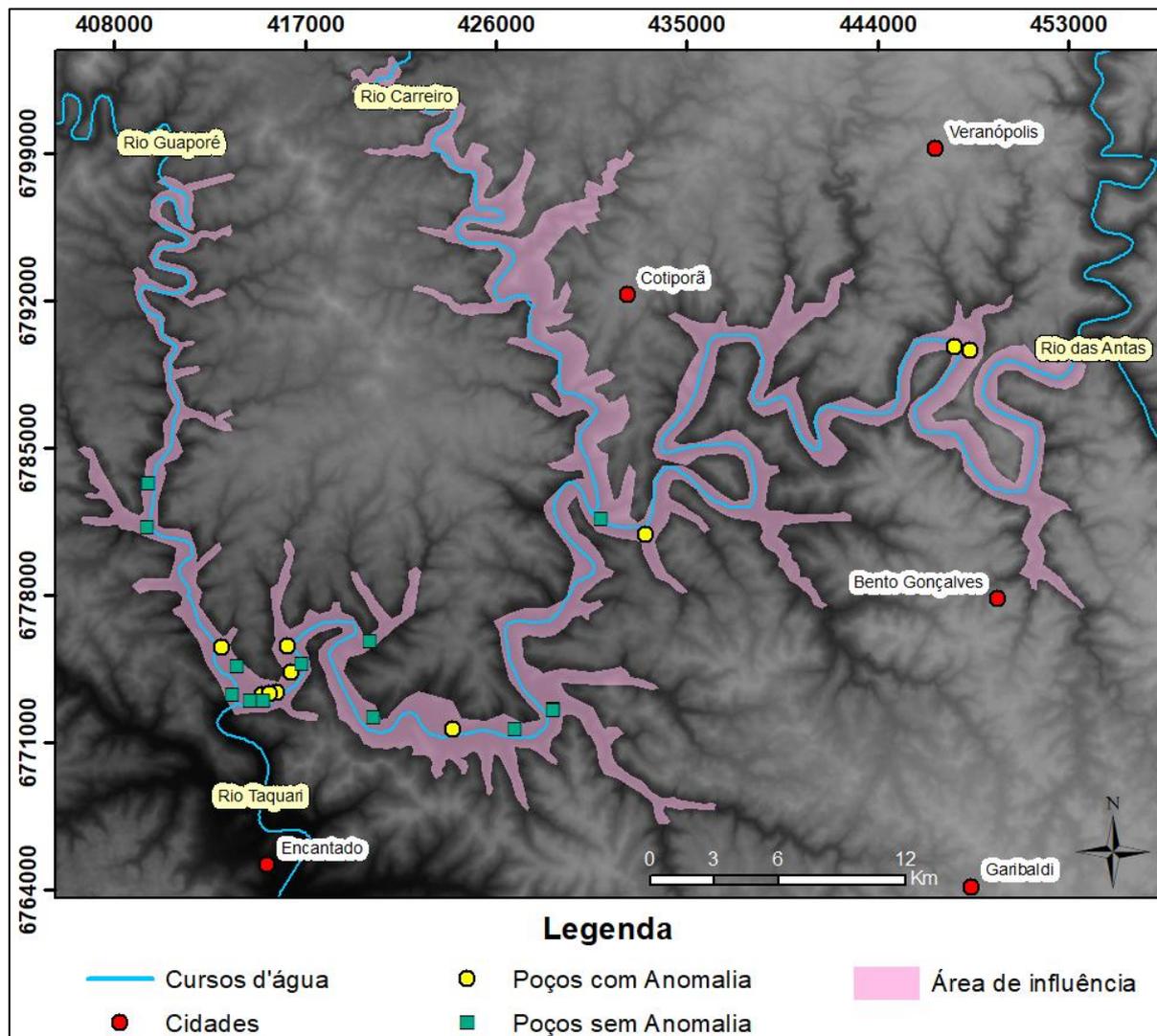
Figura 109 - Áreas de influência de interações.



De modo a avaliar a área de influência delimitada, foi feito um levantamento no banco de dados do SASG visando os poços que não foram incluídos na avaliação hidroquímica por não possuírem as informações de todos os parâmetros necessários, e que estão situados no interior dessa área. Com isso, foram identificados 32 poços, dos quais 26 possuem informações de pelo menos um dos parâmetros traçadores para as interações (Figura 110).

Para avaliar quais desses poços possuem algum indício de anomalia foram definidos como valores de referência para o sódio, o sulfato e a condutividade elétrica, os patamares identificados na análise binária na separação dos grupos com e sem misturas, sendo estes 50 mg/l, 35 mg/l e 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. A análise binária do cloreto não apresentou um limiar bem definido, e por isso optou-se por utilizar como referência 27 mg/l, que é o menor valor encontrado para as águas do grupo C4-SAG, que proporciona a mistura de água no SASG dessa área. Já o fluoreto não foi avaliado porque nos poucos poços que possuem essa informação os valores são muito pequenos.

Figura 110 - Localização dos poços com e sem anomalias na área de influência de interações.



Com base nos limiares definidos, foram observadas anomalias em 10 poços, enquanto que nos demais foram observados valores baixos para os parâmetros avaliados. Vale frisar

que esses poços não possuem informações hidroquímicas completas, o que poderia proporcionar uma avaliação mais criteriosa dos dados. Chama a atenção o fato de existirem poços com e sem anomalias próximos uns dos outros, o que pode ter relação com a presença ou não de conexão entre as fraturas que se interligam ao SAG, ou mesmo de uma contribuição maior do SASG na formação dessas águas.

5.4. Modelo conceitual de interações entre o SAG e o SASG

As informações levantadas nas etapas anteriores serviram de base para o desenvolvimento deste modelo conceitual, na forma de seções, que visam representar a dinâmica do fluxo de água subterrânea entre os aquíferos nas regiões onde foram identificadas as ocorrências de interações entre eles.

Antes da diferenciação entre as duas áreas é necessário definir suas características comuns. Dessa forma, para ambos os processos de interações, temos que este ocorre por influência de águas do SAG com as mesmas características, representada pelo grupo C4-SAG. Além disso, apesar da possibilidade de influência de águas provenientes do pré-SAG, assumiu-se que, ao adentrar no reservatório correspondente ao SAG, essas água passaram a interagir com as que já estavam presentes lá, compondo assim uma nova água, que representa o SAG na região, não havendo assim interação direta das águas do pré-SAG com as do SASG.

Nas seções são representadas as variações do topo do SAG, que tendem a se encontrar em grande profundidade na porção norte, assumindo valores maiores, e em alguns casos até positivos ao sul, muito por conta da atuação de grandes estruturas, com destaque nas seções para aquela que representa o conjunto de falhas existente no Vale do Rio das Antas.

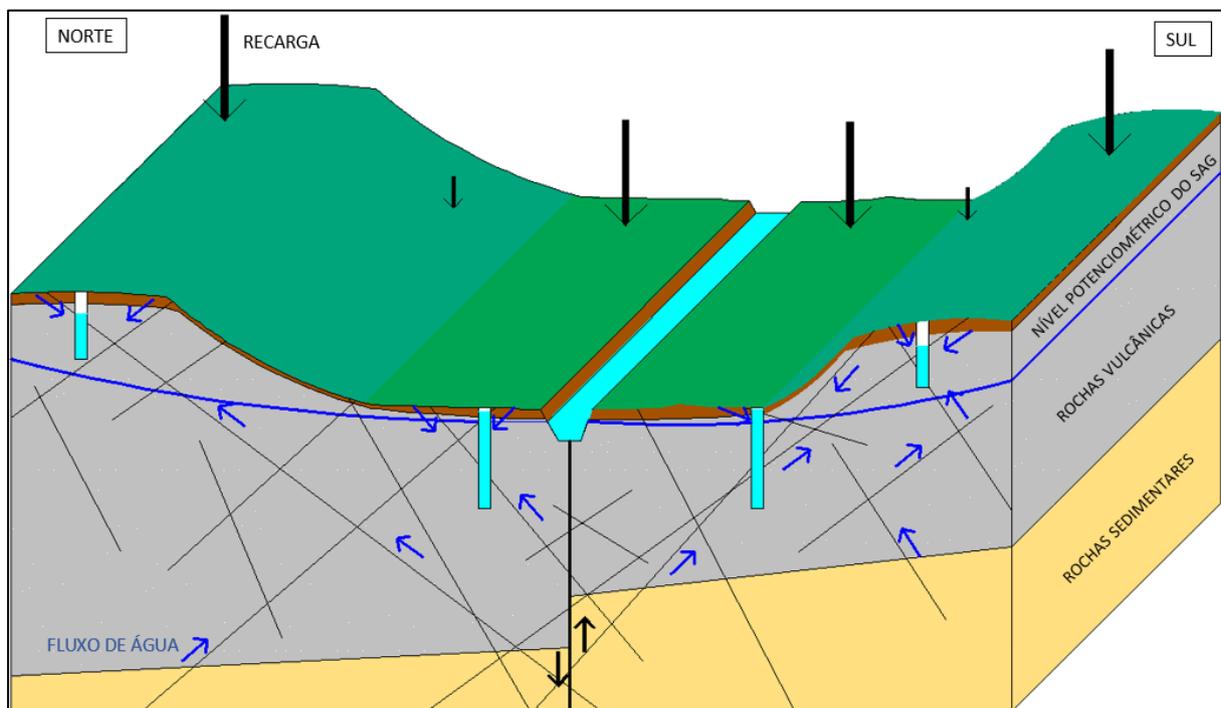
O fluxo de água ascendente, com origem no SAG, circula através das fraturas, que se conectam direta ou indiretamente, com as rochas sedimentares, até o limite do patamar onde se encontra a potenciométrica do SAG.

Nas Figuras 111 e 112 são apresentadas as seções representativas para as duas áreas de ocorrência de interações, definidas anteriormente, bem como a descrição dos processos envolvidos para a distinção das suas características.

A seção A1 representa o trecho do Rio das Antas localizado à jusante do Lineamento Rio Carreiro (LRCA), e é formado por vales mais abertos, com uma área de transição aplainada entre o alto dos morros e o rio. Tanto nessa área de transição, quanto no topo dos

morros, onde a superfície é mais plana, temos a presença de uma maior espessura de solo recobrendo as rochas vulcânicas, que tende a ser reduzida nas encostas. Essa maior espessura, aliada a uma menor declividade, facilita o processo de infiltração, proporcionando uma maior recarga das fraturas nessas áreas. Todo esse processo faz com que na área de transição exista uma maior influência de águas de rápida circulação pelas fraturas que formam SASG na proporção das misturas, reduzindo dessa forma os valores para os principais parâmetros traçadores das águas do SAG. Vale destacar que nas áreas mais elevadas, onde esse processo também ocorre, o fato de que a potenciometria do SAG se encontra muito abaixo da superfície do terreno, em profundidades onde as fraturas podem se encontrar fechadas, inviabilizam a conexão entre os aquíferos.

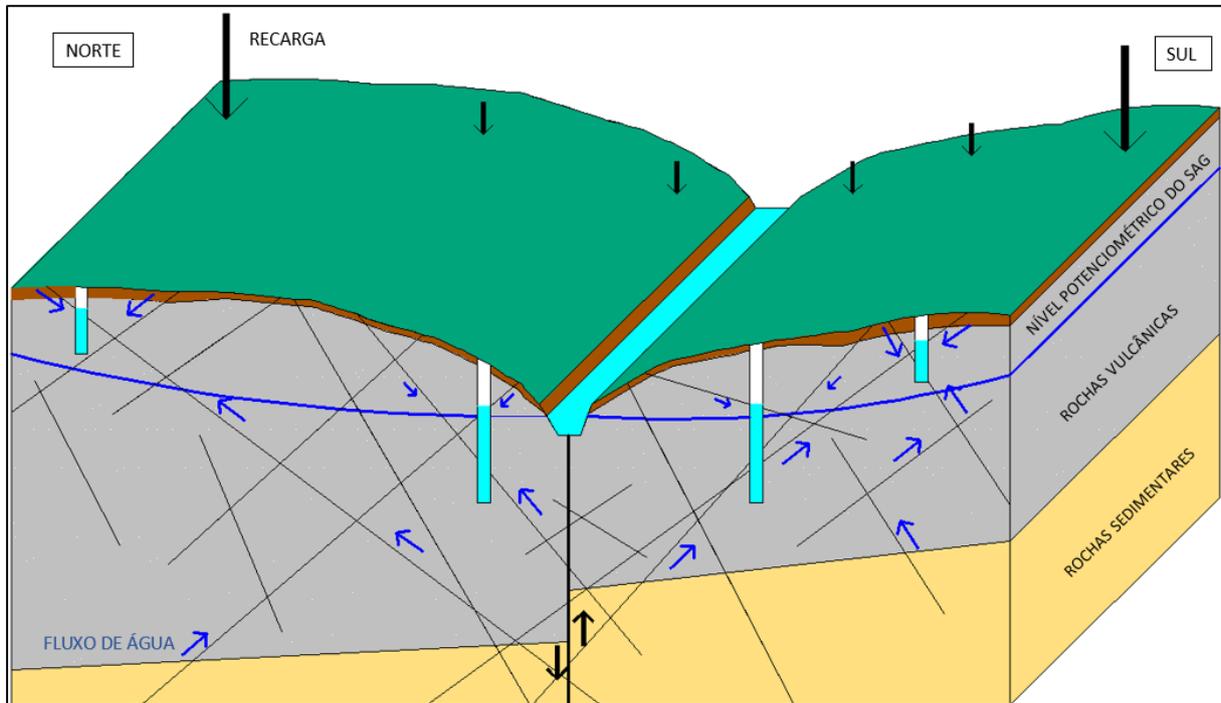
Figura 111 - Seção representativa da área de interações A1.



Por outro lado, na seção A2, que representa a porção à montante do Lineamento Rio Carreiro, essa área de transição raramente existe, sendo formado por vales muito encaixados, com grandes declividades, proporcionando menores recargas. Nessa área, os poços onde foi observada a interação entre os aquíferos estão posicionados nas encostas dos morros, sofrendo uma influência muito maior das águas do SAG. Isso reflete diretamente nas características hidroquímicas, apresentando águas muito similares às do SAG, com casos em que os valores assumem patamares superiores aos recomendados pelo Ministério da Saúde para a

potabilidade. Essa situação é importante porque muitas vezes se assume que as águas do SASG apresentam uma boa qualidade para o consumo, o que faz com que a população tenha pouco interesse em analisar se de fato isso realmente ocorre.

Figura 112 - Seção representativa da área de interações A2.



Com isso, verificou-se que existem diferentes variáveis que atuam diretamente sobre os processos de interações entre as águas do SAG e do SASG, como a necessidade de existência de uma potenciometria favorável do SAG, bem como a definição das suas características hidroquímicas relativas à área em estudo, a existência de fraturas que conectam os dois aquíferos, além das características geomorfológicas da região, que podem influenciar no nível com que a mistura de águas ocorrem.

6. CONCLUSÕES

A avaliação independente das duas áreas onde o estudo foi desenvolvido, Área da Escarpa e Área do Planalto, se mostrou muito importante, demonstrando a atuação de diferentes processos envolvidos na compartimentação do SAG na região.

Na área da escarpa a atuação das estruturas na variação do topo do SAG é menor, sendo que algumas delas estão associadas ao paleorelevo do Botucatu. No entanto observou-se uma tendência da cota do topo de acompanhar as variações do relevo da região. Dessa forma, essa área se mostrou compartimentada pela atuação de 3 grandes estruturas, onde estão localizados os rios dos Sinos, Caí e Taquari, com o fluxo de água subterrânea seguindo das áreas mais elevadas (zonas de recarga), em direção às bordas dos compartimentos, com as descargas ocorrendo tanto nas grandes drenagens, onde foram observados os poços com as melhores produtividades, quanto em rios de menor porte ao longo do caminho.

As águas dessa área foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas (15 poços), bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (25 poços) e bicarbonatadas sódicas (3 poços). O fato de existir, de maneira geral, pouca diferença entre as águas, independente dos compartimentos, demonstra que as variações que ocorrem se devem principalmente à influência das características locais, como um menor grau de confinamento, recarga e proximidade com áreas de afloramento do SAG.

Na Área do Planalto raramente verificou-se a tendência do topo do SAG de acompanhar o relevo, demonstrando dessa forma a existência de uma maior atuação estrutural nas variações dessa área, formando assim blocos altos e baixos, que independem do relevo. Nessa área, foram identificadas várias estruturas com orientações principais N60-80W, N50W, N50E e N80E e E-W, e secundárias N-S e N30W para a escala 1:1.000.000, e orientações principais N-S e E-W, e secundárias N30-40W e N70E para a escala 1:250.000. Vale ressaltar que este mesmo padrão também foi observado para a Área da Escarpa, o que mostra o caráter regional dessas estruturas.

As características do SASG mostraram que a quantidade, bem como uma maior profundidade das entradas de águas ocorrem em poços localizados principalmente próximos das grandes estruturas, com esse incremento tendo relação com o maior grau de fraturamento nessas áreas.

Com relação a potenciometria da Área do Planalto, temos que o fluxo proveniente das áreas próximas à escarpa, nas zonas de recarga, segue no sentido sul-norte, em direção ao Rio das Antas. Destacam-se ainda duas outras células de fluxo, uma no sentido norte-sul e outra

oeste-leste, que contribuem para as zonas de descarga do Rio das Antas e Rio Taquari, respectivamente. Isso mostra a importância que o Rio das Antas possui, funcionando como uma grande zona de descarga do SAG na região. Vale destacar que, assim como na Área da Escarpa, a potenciometria do SAG nos poços localizados nos Vales do Rio das Antas e do Rio Carreiro também estão posicionadas em cotas próximas à dos níveis dos rios, o que não ocorre, por exemplo, no Vale do Rio da Prata.

A avaliação das características do SAG permitiu a definição das principais estruturas que compartimentam o aquífero na região. Parte dessas estruturas são reflexo em escala de maior detalhe de falhas regionais, identificadas por outros autores, e que em alguns casos podem interceptar todo o pacote de rochas, desde a superfície até o embasamento, permitindo assim uma conexão entre os aquíferos.

O posicionamento das razões isotópicas das águas dos sistemas aquíferos próximo das Retas Meteoricas Mundial e de Porto Alegre, indicam uma origem meteórica para estas águas. Com relação aos valores encontrados, verificou-se a formação de dois conjuntos, um formado por razões mais depletadas, composta principalmente por poços do SAG, e outro com razões menos depletadas, e composto por poços do SASG, e do SAG que possuem contribuição de água das fraturas das rochas vulcânicas.

A características hidroquímicas do SAG permitiu o agrupamento dos poços desse aquífero em 4 grupos, o C1-SAG, com águas características de zonas de recarga e de baixo confinamento, o C2-SAG com águas mais mineralizadas, mas com influência da contribuição das rochas vulcânicas, e o C3-SAG e o C4-SAG, com águas típicas do SAG de alto confinamento, com valores elevados de sódio, cloreto, fluoreto, sulfato e condutividade elétrica, com possibilidade ainda de influência de águas provenientes do pré-SAG.

Para a hidroquímica do SASG também foi observada a formação de 4 grupos, com o C1-SASG e C2-SASG apresentando características típicas para este aquífero, com águas pouco mineralizadas e relacionadas principalmente aos íons bicarbonato, cálcio e magnésio. Já nos dois outros grupos destacam-se a presença de valores mais elevados dos parâmetros que constituem as águas do SAG de alto confinamento na região, com águas que variam de bicarbonatadas sódicas à sulfatadas ou cloretadas sódicas.

As informações hidroquímicas dos aquíferos permitiu definir que as interações ocorrem a partir da existência de potenciometria favorável do SAG, aliada a presença de estruturas de conexão, tendo reflexo nas águas dos grupos C3-SASG e C4-SASG dos marcadores hidroquímicos do SAG na região.

Os resultados desse estudo mostram que a existência de interações entre os aquíferos, devem ser baseadas não apenas em um único elemento, mas sim em um conjunto de informações, como os principais parâmetros traçadores do SAG, que precisam ser identificados para cada região, bem como da existência de uma potenciometria favorável do SAG, e de estruturas de conexões, que permitam o fluxo entre os aquíferos.

O detalhamento das seções representativas do modelo conceitual de interações mostra uma importante atuação da geomorfologia e das estruturas nos processos que envolvem as misturas entre as águas, com as áreas onde os vales são mais aplainados, permitindo uma maior recarga das fraturas que formam o SASG, proporcionando uma mineralização menor das águas, ao contrário do que ocorre em vales mais fechados, onde a hidroquímica mostra uma influência muito maior das águas do SAG, e onde foram observados concentrações de elementos em patamares muitas vezes superiores aos recomendados pelo Ministério da Saúde para a potabilidade das águas.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo mostram a existência de uma forte atuação estrutural na compartimentação do SAG nessa área, e que permitem a conexão entre os aquíferos, favorecendo assim a interação entre as águas do SAG e do SASG na região nordeste do RS.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a ampliação do conhecimento sobre as características do SAG e do SASG, são sugeridos os seguintes estudos futuros:

- Aplicação das metodologias propostas neste trabalho quanto a avaliação das interações em outras regiões;
- O desenvolvimento de um estudo hidrogeoquímico de detalhe para corroborar a possível influência do pré-SAG nas águas do SAG, e sua origem;
- Avaliação em campo das fraturas produtoras dos poços onde foram identificadas interações, de modo a refinar o modelo conceitual proposto;
- Avaliação, a partir de métodos geofísicos, das características das estruturas compartimentadoras identificadas na região.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTER, P. E. Arcabouço Hidrogeológico do Aquífero Gigante Mercosul (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. In: Anais do I Mercosul de Águas Subterrâneas, Curitiba-PR, v. 1, p. 110-120, 1995.

ARAÚJO L. M., FRANÇA A. B., POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and Comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. *Hydrogeology Journal*, v.7, p. 317-336, 1999.

ARRAES, T. M.; CAMPOS, J. E. G. Proposição de Critérios para Avaliação e Delimitação de Bacias Hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 1, p. 81-89, 2007.

ASSINE M. L.; PIRANHA J. M.; CARNEIRO C. D. R. Os Paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Orgs.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 77-92, 2004.

ATHAYDE, G. B.; MÜLLER, C. V.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C. Estudo sobre os Tipos das Águas do Aquífero Serra Geral, no Município de Marechal Cândido Rondon – PR. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 21, n. 1, p. 111-122, 2007.

ATHAYDE, G. B. Compartimentação Hidroestrutural do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Ambiental. Curitiba-PR. UFPR. 177f., 2013.

ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. M.; ROSA FILHO, E. F.; LICHT, O. A. B. Contribuição ao Estudo da Conectividade entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG) no Estado do Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 71, n. 1, p. 36-45, 2014.

BETIOLLO, L. M. Caracterização Estrutural, Hidrogeológica e Hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral no Nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 116f., 2006.

BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; BUCHMANN FILHO, A. C. A Influência dos Basaltos e de Misturas com Águas de Aquíferos Sotopostos nas Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Serra-Geral na Bacia do Rio Piquiri, Paraná – BR. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 17, n. 1, p. 67-75, 2003.

BOFF, F. E.; MEDEIROS, M. A.; MULLER, A. L.; KOPPE, J. C. Caracterização Hidroquímica das Águas Minerais da Serra do Nordeste Gaúcho. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, Curitiba-PR. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, 18p., 2006.

BONGIOLO, A. B. S.; SOARES, A. P.; BITTENCOURT, A. V. L.; FERREIRA, F. J. F. Compartimentação Estrutural e Conectividade Hidráulica dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani: Caracterização Hidrogeoquímica na Região Central do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, v. 41, n. 2, p. 319-333, 2011.

BONGIOLO, A. B. S.; FERREIRA, F. J. F.; BITTENCOURT, A. V. L.; SALAMUNI, E. Connectivity and Magnetic-Structural Compartmentalization of the Serra Geral and Guarani Aquifer Systems in Central State of Paraná (Paraná Basin, Brazil). Revista Brasileira de Geofísica, v. 32, n. 1, p. 141-160, 2014.

BORTOLIN, T. A. Padrões Hidroquímicos e Isotópicos do Sistema Aquífero Serra Geral no Município de Carlos Barbosa, Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. IPH-UFRGS. Porto Alegre-RS, 119p., 2014.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEAO, M. I.; SCHNEIDER, V. E. Hidrogeologia e Hidroquímica dos Aquíferos Fraturados Associados às Rochas Vulcânicas Ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). Revista Ambiente & Água, v. 9, p. 55-67, 2014.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEÃO, M. I.; SCHNEIDER, V. E. Relação entre Padrões Hidroquímicos e as Profundidades das Fraturas com Entradas de Água em Rochas Vulcânicas Ácidas da Formação Serra Geral. Revista Águas Subterrâneas, v. 30, n. 1, p. 99-118, 2016.

BORTOLIN, T. A. Estudo da Recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. IPH-UFRGS. Porto Alegre-RS, 220p., 2018.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral, Decreto-Lei nº 7.841 de 08/08/1945 sobre Código de Águas Minerais. Diário Oficial da União, 1945.

BRASIL. Portaria Consolidada nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde. Consolida as normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: CPRM, Escala: 1:750.000, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 326p., 2011.

DANTAS, M. E.; VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. Origem das Paisagens. In: VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, Mapa e DVD-ROM, 250p., 2010.

DEMETRIO, J. G. A.; CORREIA, L. C.; SARAIVA, A. L. Utilização de Imagens SRTM na Confecção de Mapas Potenciométricos. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba-PR. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 20p., 2006.

DIAS, K. D. N. Análise Estratigráfica da Formação Pirambóia, Permiano Superior da Bacia do Paraná, Leste do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS. Porto Alegre-RS, 83f., 2006.

FACCINI, U. F.; GIARDIN, A.; MACHADO, J. L. F. Heterogeneidades Litofaciológicas e Hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: PAIM, P. S. G; FACCINI, U. F.; NETTO, R. G. (Ed.), Geometria, Arquitetura e Heterogeneidades de Corpos Sedimentares. 1ª ed. São Leopoldo: UNISINOS, p. 147-173, 2003.

FEITOSA, E. C. Pesquisa de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Ed.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, p. 53-80, 1997.

FERNANDES, A. J. Aquíferos Fraturados: uma Revisão dos Condicionantes Geológicos e dos Métodos de Investigação. Revista do Instituto Geológico, v. 29, p. 49-72, 2008.

FERREIRA, F. J. F.; PORTELA FILHO, C. V.; ROSA FILHO, E. F.; ROSTIROLLA, S. P. Conectividade e Compartimentação dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani na Região Central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, v. 5, p. 61-74, 2005.

FETTER, C. W. Applied Hydrology. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 4th Edition, 598p., 2001.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Groundwater. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 604p., 1979.

FREITAS, M. A.; MACHADO, J. L. F.; VIERO, A. C.; TRAININI, D. R.; GERMANO, A. O.; GLUGLIOTTA, A. P.; CAYE, B. R.; PIMENTEL, G. B.; MARQUES, J. L.; GOFFERMANN, M.; SILVA, P. R. R. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: um

Avanço no Conhecimento das Águas Subterrâneas no Estado. In: XIII Congresso brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá-MT. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14p., 2004.

FREITAS, M. A. Recursos Hídricos Subterrâneos. In: VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, p. 71-86, 2010.

FREITAS, M. A.; ROISENBERG, A.; CUNHA, G. G. Caracterização Hidrogeoquímica das Fontes Termiais da Região do Alto Rio Uruguai – RS e SC. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Gramado-RS. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, 4p., 2011.

FREITAS, M. A.; BINOTTO, R. B.; NANNI, A. S.; RODRIGUES, A. L. M.; BORTOLI, C. R. Avaliação do Potencial Hidrogeológico, Vulnerabilidade Intrínseca e Hidroquímica do Sistemas Aquífero Serra Geral no Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2, p. 31-41, 2012.

FREITAS, M. A. Hidrogeoquímica e Isotopia de Águas com Alta Salinidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região do Alto Rio Uruguai, Brasil. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 195f., 2016.

FREITAS, M. A.; ROISENBERG, A.; ANDRIOTTI, J. L. S. Análise Exploratória de Dados da Condutividade Elétrica nas Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Revista Águas Subterrâneas, v. 30, n. 1, p. 1-17, 2016.

GASTMANS, D.; KIANG, C. H. Avaliação da Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado de Mato Grosso do Sul. Revista Águas Subterrâneas, v. 19, n. 1, p. 35-48, 2005.

GASTMANS, D. Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Porção Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 194f., 2007.

GASTMANS, D.; HUTCHEON, I.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANG, H. K. Geochemical Evolution of Groundwater in a Basaltic Aquifer Based on Chemical and Stable Isotopic Data: Case Study from the Northeastern Portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo State (Brazil). Journal of Hydrology, v. 535, p. 598-611, 2016.

GASTMANS, D.; MIRA, A.; KIRCHHEIM, R.; VIVES, L.; RODRIGUES, L.; VEROSLAVSKY, G. Hypothesis of Groundwater Flow through Geological Structures in Guarani Aquifer System (GAS) using Chemical and Isotopic Data. Procedia Earth and Planetary Science, v. 17, p. 136-139, 2017.

GIARDIN, A.; FACCINI, U. F. Complexidade Hidroestratigráfica e Estrutural do Sistema Aquífero Guarani: Abordagem Metodológica Aplicada ao Exemplo da Área de Santa Maria-RS, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 18, n. 1, p. 39-54, 2004.

GIARDIN, A.; FACCINI, U. F. Termalismo e Hidroquímica como Evidências de Limite de Fluxo Regional no Sistema Aquífero Guarani no Sul do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 24, p. 1-12, 2010.

GIARDIN, A.; FACCINI, U. F. Identificação de Célula de Fluxo local no Aquífero Botucatu: Estudo de Caso no Vale do Rio Taquari, RS, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 25, p. 15-28, 2011.

GRIEBLER JÚNIOR, J. C. Origem da Precipitação no Rio Grande do Sul a partir da Composição Isotópica. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 112f., 2018.

HAUSMAN, A. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul. *Estudos Tecnológicos: Acta Geológica Leopoldensia, Série Mapas*, n° 2, p. 1-127, 1995.

HEINE, C. A.; COELHO, O. G. W.; FACCINI, U.; SILVA, M. C. A.; ESMERIS, C. Monitoramento da Depleção e Detecção dos Limites de Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Ivoti (RS): uma Aplicação de Geoprocessamento no Gerenciamento Municipal do Uso Sustentável de Recursos Hídricos Subterrâneos. *GAEA, Journal of Geoscience*, São Leopoldo-RS, v. 1, n.1, p. 26-35, 2005.

HEINE, C. A. Análise da Sustentabilidade de Uso do Sistema Aquífero Guarani em Ivoti – RS. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar. São Leopoldo. UNISINOS. 173p., 2008.

HINDI, E. C. Hidroquímica e Hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geologia. Curitiba-PR, UFPR. 156p., 2007.

HISCOCK, K. M. *Hydrogeology: Principles and Practice*. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing (1ª edição), 406p., 2005.

HOLZ, M; CARLUCCI, R. Litoestratigrafia, estratigrafia de Sequências e Evolução Paleofisiográfica da Zona de Borda da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul Durante o Eo-Permiano. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Ed. revisada), *Geologia do Rio Grande do Sul*. p. 303-322, 2002.

IBGE. Folha SH.22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação, Uso Potencial da Terra. Rio de Janeiro: IBGE, 796p, 1986.

KERN, M. L.; VIERO, A. P.; MACHADO, G. The Fluoride in the Groundwater of Guarani Aquifer System: The Origin Associated with Black Shales of Paraná Basin. *Environmental Geology*, v. 55, p. 1219-1233, 2008.

KIMMELMANN, A. A.; SILVA, R. B. G.; REBOUÇAS, A. C.; SANTIAGO, M. M. F. Hidrologia Isotópica e Química do Aquífero Botucatu – Bacia do Paraná – Brasil. In: IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Brasília-DF. Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 25p., 1986.

LASTORIA G.; GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; SINELLI, O.; HUTCHEON, I. Evidências da Conectividade hidráulica entre os Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani no Estado de Mato Grosso do Sul e Aspectos Ambientais Correlacionados. In: I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, Gramado-RS. Anais do I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, 20p., 2007.

LISBOA, N. A. Compartimentação Hidrogeológica e Diferenciação Hidrogeoquímica em Aquíferos do Extremo Sul do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. In: Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado-RS, p. 539-548, 1993.

LISBOA, N. A. Fácies, Estratificações Hidrogeoquímicas e seus Controladores Geológicos, em Unidades Hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral, na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 135f., 1996.

LÖBLER, C. A.; TERRA, L. G.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Dados da CPRM/SIAGAS e Imagens STRM como Base Cartográfica na Elaboração de Mapeamento em Recursos Hídricos Subterrâneos em Escala Municipal: o Caso de Nova Palma, RS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 07, p. 513-523, 2014.

LOGAN, J. Interpretação de análises químicas d'água. US Agency for International Development, 67p., 1965.

MACHADO, J. L. F.; FACCINI, U. F. Influência dos Falhamentos Regionais na Estruturação do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá-MT. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15p., 2004.

MACHADO, J. L. F. Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. Tese (doutorado), Programa de Pós-

Graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Sedimentar, Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, Brasil, 237f., 2005a.

MACHADO, J. L. F. Sistema Aquífero Guarani: Mitos e Fatos. In: II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, Ribeirão Preto-SP. Anais do IIº Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, 10p., 2005b.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: Relatório Final. Porto Alegre: CPRM. 65p., CD-ROM e Mapa em escala 1:750.000, 2005.

MANASSES, F.; ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo Hidrogeoquímico da Formação Serra Geral na Região Sudeste do Estado do Paraná. Revista Águas Subterrâneas, v. 21, n. 2, p. 49-58, 2007.

MANCUSO, M. A.; FORMENTINI, J.; GRIEBELER, J. S. Caracterização de Hipotermalismo na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte-MG. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11p., 2014.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Ed.). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, p. 13-33, 1997.

MARIMON, M. P. C.; ROISENBERG, A.; SUHOGUSOFF, A. V.; VIERO, P. A. Hydrogeochemistry and Statistical Analysis Applied to Understand Fluoride Provenance in the Guarani Aquifer System, Southern Brazil. Environmental Geochemistry and Health, v. 35, p. 391-403, 2013.

MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. O. Magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: NETO, V. M.; BARTONELLI, A.; CARNEIRO, C. D.; BRITO-NEVES. B. B., Eds., Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flavio Marques Almeida, Editora Beca, São Paulo, p. 245-263, 2004.

MENEZES, J. R. C. Estratigrafia do Neopermiano da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M. & DE ROS, L. F. (Ed. revisada), Geologia do Rio Grande do Sul, p. 323-334, 2002.

MILANI, E. J. Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. 2v. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2v., 255p., 1997.

MILANI, E. J.; FACCINI, U. F.; SCHERER, C. M.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. Sequences and Stratigraphic Hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. *Boletim do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*, v. 29, p. 125-173, 1998.

MILANI, E. J. Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental e a Evolução Geológica da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M. & DE ROS, L. F., *Geologia do Rio Grande do Sul*, p. 275-302, 2002.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro*, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MOBUS, G. Análise Estrutural e Hidrogeológica do Aquífero Fraturado da Formação Serra Geral Região Noroeste do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos e Saneamento, IPH/UFRGS, 124f., 1987.

MOBUS, G. Qualigraf: Programa para Análise da Qualidade da Água. Fortaleza: FUNCEME. Disponível em: <http://www.funceme.br/qualigraf>. Acesso em: 20 novembro de 2016.

MOCELLIN, R. C.; FERREIRA, F. J. F. Conectividade e Compartimentação dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani no Sudoeste do Estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 3, p. 567-579, 2009.

NANNI, A. S. O Flúor em Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: Origem e Condicionamento Geológico. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências da Universidade do Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 127f., 2008.

NANNI, A. S. ROISENBERG, A.; MARIMON, M. P. C.; VIERO, A. P. The Hydrochemical Facies and Anomalous Fluoride Content in the Serra Geral Aquifer System, Southern Brazil: A GIS Approach with Tectonic and Principal Component Analysis. *Environmental Geology*, v. 58, issue 6, p. 1247-1255, 2009.

NANNI, A. S.; ROISENBERG, A.; HOLLANDA, M. H. B. M.; MARIMON, M. P. C.; VIERO, A. P.; SCHEIBE, L. F. Fluoride in the Serra Geral Aquifer System: Source Evaluation Using Stable Isotopes and Principal Component Analysis. *Journal of Geological Research*, v. 2013, p. 1-9, 2013.

O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D. & POHN, H.A. 1976. Lineament, Linear and Lineation: Some Proposed New Standarts for Old Terms. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 87, p. 1463-1469, 1976.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Condições de Circulação do Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, supl. 1, p. 186-195, 2012.

PAULA, T. L. F.; CAMPOS, J. E. G. Aquíferos com Fluxos Controlados Simultaneamente por Porosidade Intergranular e Planar: Aplicação a Rochas Metassedimentares do Alto Paraguai, MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 11-24, 2016.

PHILIPP, R. P.; ROLIM, S. B. A.; MALTA, L.; JELINEK, A. R.; VIANA, A.; LAVINA, E.; CAGLIARI, J.; FACCINI, U. F. Estruturação do Arco de Rio Grande e da Sinclinal de Torres, Bacia do Paraná, RS: Evidências por Levantamentos Magnetotélúricos. In: VI SIMPOSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOFISICA, Porto Alegre: SBGf, v. 1, p. 121-125, 2014.

PORTELA FILHO, C. V.; FERREIRA, F. J. F.; ROSA FILHO, E. F.; ROSTIROLLA, S. P. Compartimentação Magnética-Estrutural do Sistema Aquífero Serra Geral e sua Conectividade com o Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, p. 369-381, 2005.

QUEIROZ, G. L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R. AzimuthFinder: Ferramenta para a Extração de Dados e Apoio na Análise Estrutural. *Revista Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v.14, n.1, p.69-80, 2014.

REGINATO, P. A. R. Integração de Dados para Prospecção de Aquíferos Fraturados em Trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS). Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 254p., 2003.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos fraturados da formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá-MT. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15p., 2004a.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá-MT. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14p., 2004b.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Integração de Dados Geológicos na Prospecção de Aquíferos Fraturados na Formação Serra Geral. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 20, n.1, p. 1-14, 2006a.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Estrutural dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 1, p. 13-22, 2006b.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; GILIOLI, K. C. Hidrodinâmica de Diferentes Aquíferos Fraturados Associados à Formação Serra Geral na Região Nordeste do estado do Rio Grande do Sul. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luís-MA. *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 2010.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S.; SCHNEIDER, V. E. Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 1, p. 65-78, 2013.

ROLDAN, L. F.; MACHADO, R.; STEIDER, S. S.; WARREN, L. V. Análise de Lineamentos Estruturais no Domo de Lages (SC) com Uso de Imagens de Satélite e Mapas de Relevo Sombreado. *Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Científica*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 57-72, 2010.

ROISENBERG, A.; VIERO, A. P. O Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, M.; DE ROS, L. F. (Ed revisada), *Geologia do Rio Grande do Sul*. p. 355-374, 2002.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; ROSTIROLLA, S. P.; FERREIRA, F. J. F.; BITTENCOURT, A. V. L. Sistema Aquífero Guarani: Considerações Preliminares sobre a Influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas subterrâneas. *Revista Águas Subterrâneas*, v.17, p. 91-111, 2003.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (2ª edição). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM, p. 81-108, 2000.

SCHERER, C. M. S. Análise Estratigráfica e Litofaciológica da Formação Botucatu (Neocomiano) no Estado do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 208p., 1998.

SCHERER, C. M. S. Eolian Dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in the Southernmost Brazil: Morphology and Origin. *Sedimentary Geology*, v. 137, p. 63-84, 2000.

SCHERER, C. M. S.; FACCINI, U. F.; LAVINA, E. L. Arcabouço Estratigráfico do Mesozóico da bacia do Paraná. In: HOLZ, M. & DE ROS, L. F. (Ed. revisada), *Geologia do Rio Grande do Sul*, p. 335-354, 2002.

SILVA, R. B. G. Estudo Hidroquímico e Isotópico das Águas Subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. Tese (doutorado), Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 133p., 1983.

SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C. L.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA R. B. C. 2003. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores (Capítulo II). In: BIZZI L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI R. M.; GONÇALVES J. H. (Eds), Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília, CPRM, p. 55-85, 2003.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. Compartimentação Estrutural da Bacia do Paraná: a Questão dos Lineamentos e sua influência na Distribuição do Sistema Aquífero Guarani. Geociências, UNESP, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 297-311, 2007a.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. Variabilidade Espacial no Sistema Aquífero Guarani: Controles Estruturais e Estratigráficos. Revista Águas Subterrâneas, v. 21, n. 1, p. 51-64, 2007b.

SOARES, A. P. Variabilidade Espacial no Sistema Aquífero Guarani: Controles Estratigráficos e Estruturais. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. UFRGS. 196f., 2008.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. Correlações Estratigráficas Conflitantes no Limite Permo-Triássico no Sul da Bacia do Paraná: O Contato entre duas Sequências e Implicações na Configuração Espacial do Aquífero Guarani. Revista Pesquisas em Geociências, v. 35, p.115-133, 2008a.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. Heterogeneidades Hidroestratigráficas no Sistema Aquífero Guarani. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, p. 598-617, 2008b.

SOUSA, E. R.; SOUSA, R. J. P.; HALLMANN, J. R. Avaliação Preliminar dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Lajeado-RS-Brasil. In: XII Congresso brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis-SC. Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10p., 2002.

TAKAHASHI, H. A.; HAERTEL, V.; LISBOA, N. A. Caracterização Morfoestrutural e Hidrogeológica de Aquíferos em Meio Fraturado através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Análise Estatística em Setor do Planalto Meridional – RS. In: Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 332-350, 1993.

TEIXEIRA, G. V.; VIERO, P. A. Hydrogeochemical Evolution of Mesozoic Aquifers in the Southern Paraná Basin in Western Rio Grande do Sul State, Brazil. Revista Águas Subterrâneas, v. 31, n.1, p. 36-51, 2017.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Unidades Litológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Itu, Oeste do Rio Grande do Sul. Ciência e Natura, Santa Maria: UFSM, v. 28, n. 2, p. 67-84, 2006.

UEHARA, K. Elementos de Hidrologia de Superfície. In: GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos (2ª ed). São Paulo: Oficina de Textos, p. 57-80, 2013.

UMANN, L. V.; LIMA, E. F.; SOMMER, C. A.; DE LIZ, J. D. Vulcanismo Ácido da Região de Cambará do Sul-RS: Litoquímica e Discussão sobre a Origem dos Depósitos. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 3, p. 357-364, 2001.

USGS – United States Geological Survey. (2016). SRTM - Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 20 de novembro de 2016.

WAICHEL, B. L.; SCHERER, C. M. S.; FRANK, H. T.: Basaltic Lava Flows Covering Active Aeolian Dunes in the Paraná Basin in Southern Brazil: Features and Emplacement Aspects. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 171, p. 59–72, 2008.

WANKLER, F. L. Arquitetura Depositional e Compartimentação Estrutural do Aquífero Passo das Tropas, na Região de Santa Maria-RS: Influência no Comportamento Hidrogeológico. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração em Geologia Sedimentar, Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, São Leopoldo, Brasil, 194f., 2006.

WILDNER, W.; ORLANDI FILHO, V.; GIFFONI, L. E. Itaimbezinho e Fortaleza, RS e SC - Magníficos Canyons Esculpidos nas Escarpas Aparados da Serra do Planalto Vulcânico da Bacia do Paraná. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E. T.; Campos, D. A.; Souza, C. R. G.; Fernandes, A. C. S. (Edit.), Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 2006 Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/sitio050/sitio050.pdf> Acesso em: 11 de fevereiro de 2018.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, p. 441-477, 1987.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: Interior Cratonic Basins, Leighton et al. (coords). AAPG Memoir, n. 51, p. 681-708, 1990.

ANEXOS

Anexo A – Características dos poços do SAG da Área do Planalto.

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Prof. Topo do SAG	Cota Topo do SAG	Prof. NE	qs 24h	Q 24h
P1	182	-		Bento Gonçalves	200	175	7	-	-	-
P2	191	443349	6786273	Bento Gonçalves	210	200	-9	-	-	-
P3	563	446113	6783044	Bento Gonçalves	856	756	-193	476,34	0,405	12,37
P4	237	438125	6789593	Bento Gonçalves	296	270	-33	146,25	4,774	2,53
P7	747	507311	6748456	Gramado	1000	717	30	560,5	-	-
P8	506	514385	6744700	Gramado	700	505	1	318,8	-	-
P9	547	-		Nova Araçá	825	747	-200	222,21	-	-
P11	450	449706	6816717	Nova Prata	714	614	-164	250,81	-	-
P14	262	454380	6798773	Veranópolis	384	294	-32	278,88	0,327	10,778
P15	685	-		Veranópolis	902	802	-117	474,53	3,073	12,2
P16	730	446522	6807031	Vila Flores	1000	778	-48	541	0,691	15,5
P17	614	-		Garibaldi	800	642	-28	580	0,82	12
P18	692	435076	6824905	Nova Prata	2251	857	-165	-	-	-
P19	673	442242	6811686	Nova Prata	881	765	-92	451	-	-
P34	46	414518	6765884	Encantado	265	140	-94	30,41	2,649	30,46
P36	55	413841	6765678	Encantado	246	161	-106	42,95	1,916	48,65
P57	256	467791	6747770	Alto Feliz	250	192	64	-	-	-
P115	143	451212	6734089	São José do Sul	174	160	-17	37,5	-	-
P117	127	454386	6736804	São José do Sul	160	138	-11	27,6	-	-
P127	183	466429	6749601	São Vendelino	250	234	-51	120	-	-
P128	299	475632	6750714	Vale Real	273	190	109	208,6	-	-
P198	54	414559	6769036	Encantado	221	216	-162	29	-	-
P199	63	415441	6763542	Encantado	141	130	-67	20	-	-
P304	328	460221	6739407	Tupandi	412	290	38	277,9	0,915	5,92
P307	81	413427	6765332	Encantado	256	224	-143	90,21	0,799	27,8
P311	618	-		Farroupilha	850	571	47	423,03	0,238	13,2
P352	527	488982	6751874	Nova Petrópolis	529	350	177	-	-	-
P354	180	429970	6787920	Cotiporã	325	312	-132	77,7	-	-

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Prof. Topo do SAG	Cota Topo do SAG	Prof. NE	qs 24h	Q 24h
P355	829	532853	6755605	São Francisco de Paula	900	710	119	-	-	-
P385	384	446333	6740024	Salvador do Sul	204	164	220	53,8	-	-
P439	324	491600	6748438	Nova Petrópolis	240	110	214	180,7	0,365	13,5
P440	343	490150	6749204	Nova Petrópolis	318	174	169	144	0,169	15,6
P459	631	456294	6780440	Pinto Bandeira	750	590	41	-	-	-
P466	653	452687	6757039	Carlos Barbosa	950	700	-47	-	-	-
P467	520	401171	6786457	Doutor Ricardo	-	750	-230	-	-	-
P468	360	466296	6750542	Alto Feliz	450	430	-70	-	-	-
P469	730	482587	6775747	Caxias do Sul	756	740	-10	-	-	-
P472	360	465595	6751841	São Vendelino	466	450	-90	-	-	-
P473	560	476503	6759835	Caxias do Sul	774	680	-120	-	-	-
P474	705	476188	6791891	Flores da Cunha	858	750	-45	580	-	-
P479	176	415719	6772532	Roca Sales	312	270	-175	-	-	-
P480	113	424811	6763687	Roca Sales	-	70	48	-	-	-
P484	57	414750	6765900	Encantado	150	134	-77	52,61	0,454	20,92
P487	196	523109	6747192	Canela	180	110	86	55,12	-	-
P488	326	483831	6798617	Antônio Prado	186	168	158	73,21	-	-
P490	335	442209	6785911	Bento Gonçalves	360	342	-7	-	-	-
P493	526	458763	6748054	Barão	-	605	-79	-	-	-
P494	236	404323	6765995	Nova Bréscia	-	502	-266	-	-	-
P495	589	403246	6798031	Anta Gorda	-	804	-215	-	-	-
P496	126	448133	6789566	Veranópolis	-	145	-19	-	-	-
P497	238	422989	6804851	Vista Alegre do Prata	402	402	-164	-	-	-
P498	80	429686	6783137	Santa Tereza	126	108	-28	-	-	-
P499	760	479399	6773155	Caxias do Sul	733	700	60	600	-	-
P500	280	442546	6795768	Veranópolis	-	510	-230	179	-	-
P502	690	439344	6814168	Nova Prata	901	774	-84	-	-	-
P503	685	444890	6807533	Vila Flores	810	790	-105	485,2	-	-
P504	357	455068	6802547	Antônio Prado	402	370	-13	-	-	-

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Prof. Topo do SAG	Cota Topo do SAG	Prof. NE	qs 24h	Q 24h
P506	778	490769	6801073	São Marcos	750	740	38	430	-	-
P507	729	480332	6791002	Flores da Cunha	772	760	-31	-	-	-
P508	722	446852	6809944	Vila Flores	858	810	-88	-	-	-
P509	550	433223	6795116	Cotiporã	720	714	-164	-	-	-
P510	695	-	-	Farroupilha	650	634	61	-	-	-
P511	695	-	-	Farroupilha	726	720	-25	584,6	-	-
P512	736	-	-	Canela	800	750	-14	-	-	-
P513	598	-	-	Flores da Cunha	650	630	-32	-	-	-
P514	538	-	-	São Valentim do Sul	666	660	-122	252,5	-	-
P515	394	-	-	Nova Bréscia	660	650	-256	250	-	-
P516	430	-	-	Westfália	456	426	4	318	-	-

Referências:

Profundidade final: m

Cota do terreno (CT): m.s.n.m.

Profundidade do topo do SAG: m

Cota do topo do SAG: m.s.n.m.

Profundidade do nível estático (Prof. NE): m

Capacidade específica (qs): m³/h.m

Vazão (Q): m³/h

Cota da base: m.s.n.m.

Profundidade da entrada de água mais profunda (Prof. EA basal): m

Cota de referência (cota de ref.): m.s.n.m.

Anexo B – Características dos poços do SASG da Área do Planalto.

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Cota da Base	Prof. EA Basal	Prof. NE	qs 24h	Q 24h	Cota de Ref.
S7	560	450250	6775350	Bento Gonçalves	132	428	90	18,3	-	-	470
S8	540	451375	6772570	Bento Gonçalves	100	440	55	-	-	-	485
S9	600	449950	6775575	Bento Gonçalves	150	450	108	85,89	0,209	4,212	492
S11	96	438924	6781655	Bento Gonçalves	64	32	-	1,3	-	-	94,7
S12	90	436156	6782511	Bento Gonçalves	90	0	-	2,4	-	-	87,6
S36	225	437155	6785640	Bento Gonçalves	362	-137	-	122,9	0,286	14,41	102,1
S37	285	446503	6789688	Bento Gonçalves	306	-21	300	179	1,229	14,1	-15
S74	176	427971	6792793	Cotiporã	130	46	128	76,5	0,455	2,002	48
S89	95	437886	6782261	Cotiporã	60	35	45	10,3	9,801	54,69	50
S90	159	429289	6789767	Cotiporã	280	-121	278	63,15	0,401	18,16	-119
S93	564	432451	6793490	Cotiporã	230	334	57	47,8	0,091	1,683	507
S100	670	446031	6797792	Veranópolis	244	426	32	49	0,0248	3,678	638
S117	655	438856	6807357	Vila Flores	126	529	90	17,4	0,027	1,57	565
S160	572	435295	6813612	Nova Prata	47	525	28	5,73	-	-	544
S166	694	443487	6816280	Nova Prata	130	564	76	19,9	-	-	618
S174	638	443159	6822365	Nova Prata	90	548	45	5,3	-	-	593
S177	733	440307	6821453	Nova Prata	72	661	58	4,6	-	-	675
S207	597	436564	6815194	Nova Prata	104	493	81	50,7	0,228	7,15	516
S260	414	417457	6779758	Muçum	59	355	21	0,55	-	-	393
S261	73	415160	6773396	Muçum	110	-37	-	21,6	-	-	51,4
S264	619	449170	6796934	Veranópolis	67	552	60	45,2	0,88	8,175	559
S267	136	416144	6774581	Muçum	162	-26	156	37,7	-	-	-20
S270	73	428004	6776794	Muçum	80	-7	-	22	-	-	51
S271	89	428189	6771794	Muçum	60	29	-	16,2	-	-	72,8
S275	70	418579	6775343	Muçum	60	10	-	18,8	-	-	51,2
S278	63	414097	6774011	Muçum	130	-67	-	11,4	-	-	51,6
S280	62	411583	6779270	Muçum	85	-23	-	6,5	-	-	55,5
S318	555	425370	6829473	Nova Araçá	150	405	66	59,71	-	-	489

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Cota da Base	Prof. EA Basal	Prof. NE	qs 24h	Q 24h	Cota de Ref.
S319	538	425043	6829555	Nova Araçá	100	438	49	49,45	1,51	26,3	489
S328	512	422940	6830292	Nova Araçá	81	431	65	2,7	-	-	447
S334	619	452186	6799953	Veranópolis	168	451	85	24	0,078	4,944	534
S343	541	424988	6829513	Nova Araçá	52	489	49	24,25	-	-	492
S426	680	473893	6810302	Antônio Prado	264	416	75	2	2,17	16,216	605
S428	720	471547	6808509	Antônio Prado	90	630	52	14,48	0,426	6,206	668
S432	695	470475	6807600	Antônio Prado	171,5	523,5	169	76,76	-	-	526
S479	317	447754	6790429	Veranópolis	410	-93	70	-	-	-	247
S535	635	451650	6750715	Barão	105	530	91	42,99	-	-	544
S568	644	451631	6750481	Barão	204	440	37	4,4	-	-	607
S577	432	434617	6753835	Boa Vista do Sul	75	357	-	2,2	0,781	20,3	429,8
S585	485	435053	6754796	Boa Vista do Sul	120	365	87	8,1	0,018	1,2	398
S628	522	525624	6753326	Canela	89	433	-	34,72	2,166	33,1	487,28
S686	569	450094	6758470	Carlos Barbosa	140	429	74	1,18	0,749	27,31	495
S988	448	431746	6801392	Fagundes Varela	190	258	120	6	0,274	6,43	328
S1011	550	432971	6804942	Fagundes Varela	54	496	38	6,68	0,198	6,153	512
S1025	737	467924	6767495	Farroupilha	126	611	27	50	0,041	1,324	710
S1077	654	466962	6769378	Farroupilha	72	582	41	0,84	1,326	36	613
S1128	676	474639	6784372	Flores da Cunha	210	466	39	31,21	0,068	1,194	637
S1133	722	481568	6789743	Flores da Cunha	79	643	27	0,84	1,469	24,827	695
S1135	728	482608	6787238	Flores da Cunha	120	608	99	2,1	2,136	29,333	629
S1284	690	508777	6742012	Gramado	74	616	50	7,42	0,584	11,4	640
S1285	707	509634	6737576	Gramado	300	407	-	56,83	0,178	4,04	650,17
S1527	520	431955	6819462	Nova Bassano	90	430	56	30,04	4,793	37	464
S1531	537	431657	6820299	Nova Bassano	170	367	158	61,73	0,27	10,09	379
S1532	514	432156	6819038	Nova Bassano	174	340	157	3,45	0,081	10,18	357
S1535	540	431452	6820151	Nova Bassano	162	378	134	126,81	1,608	16,45	406
S1557	297	400039	6767727	Nova Bréscia	130	167	-	28,43	0,45	8	268,57
S1717	75	429939	6772501	Santa Tereza	109	-34	66	12	3,909	17,2	9

	CT	UTMe	UTMs	Municípios	Prof. Final	Cota da Base	Prof. EA Basal	Prof. NE	qs 24h	Q 24h	Cota de Ref.
S1718	84	429077	6772763	Santa Tereza	74	10	-	13,09	-	-	70,91
S1800	83	430158	6784397	São Valentim do Sul	90	-7	-	9,4	-	-	73,6
S1802	73	430537	6779239	São Valentim do Sul	154	-81	-	20,8	-	-	52,2
S1803	165	427229	6782300	São Valentim do Sul	100	65	-	12,7	-	-	152,3
S1862	537	408601	6825224	Serafina Corrêa	122	415	90	48,83	2,524	31,68	447
S1864	550	408652	6825503	Serafina Corrêa	90	460	70	42,83	2,667	47,368	480
S1868	502	408890	6823700	Serafina Corrêa	134	368	127	24,62	0,116	9,103	375
S1873	523	407828	6824120	Serafina Corrêa	100	423	76	41,38	4,416	45	447
S1874	518	408904	6822374	Serafina Corrêa	108	410	55	39,01	5,968	34,434	463
S1876	533	408164	6825299	Serafina Corrêa	120	413	102	53,91	0,616	32,143	431
S1912	680	447301	6800164	Veranópolis	170	510	135	40,7	-	-	545
S1935	550	445204	6791952	Veranópolis	110	440	78	21,6	0,1	6,21	472
S1937	493	441608	6790200	Veranópolis	300	193	90	56,8	-	-	403
S1944	505	439623	6798395	Veranópolis	120	385	95	57	-	-	410
S1945	565	437055	6800825	Veranópolis	105	460	100	30	-	-	465
S1946	548	449312	6800876	Veranópolis	210	338	75	37,3	-	-	473
S1947	676	447641	6801051	Veranópolis	172	504	160	82,2	-	-	516
S2072	674	481800	6779375	Caxias do Sul	150	524	80	31	0,053	3,845	594
S2075	488	433125	6790332	Cotiporã	180	308	62	5	0,112	5,558	426
S2117	618	449826	6763171	Garibaldi	132	486	80	53,6	3,073	16,503	538
S2118	619	450046	6763060	Garibaldi	150	469	122	59,7	0,452	5,556	497
S2124	647	431872	6828080	Nova Araçá	111	536	70	17,2	0,197	5,556	577
S2131	588	436958	6816877	Nova Prata	163	425	125	15	0,0148	1,476	463
S2134	678	442785	6814568	Nova Prata	158	520	20	7,3	0,00796	1,041	658
S2141	699	436254	6824149	Nova Prata	90	609	55	12,2	0,854	11,415	644
S2143	686	442938	6814212	Nova Prata	100	586	34	-	0,292	8	652

Anexo C – Parâmetros físico-químicos do SAG da Área do Planalto.

	Coleta	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Bicarbonato	CE	pH	Temperatura	Cloreto	Fluoreto	Sulfato
P1	28/11/2018	38,40	ND	0,29	92,70	37,00	482,00	7,54	22,30	7,00	0,56	195,00
P4	28/03/2019	14,20	0,01	1,27	162,00	37,00	1478,00	7,18	26,70	76,00	2,80	240,00
P11	23/11/2015	3,49	0,02	0,61	154,01	65,34	760,00	9,19	40,30	26,93	2,47	218,35
P14	21/06/2007	44,00	2,67	4,87	47,00	16,70	436,00	6,13	19,00	14,40	1,00	200,00
P15	28/11/2018	0,90	0,02	1,16	219,00	50,00	1057,00	7,80	29,00	50,00	2,70	258,00
P16	28/03/2019	4,78	ND	1,10	116,00	52,00	1145,00	6,76	38,40	47,00	2,57	216,00
P17	28/11/2018	21,10	1,63	1,83	120,00	129,00	714,00	7,35	37,80	60,00	2,05	150,00
P9	09/09/2019	0,98	ND	0,35	79,70	130,00	305,00	9,91	36,00	5,50	0,65	15,80
P36	13/11/2012	33,00	5,20	ND	119,00	135,00	688,00	8,40	-	50,00	1,6	120,00
P307	29/11/2006	28,00	2,00	1,30	182,00	122,00	912,00	8,30	-	74,00	0,99	198,00
P311	05/09/2016	36,63	0,51	0,98	163,94	57,82	986,00	8,17	36,80	41,87	1,66	324,10
P354	03/08/2007	6,42	1,06	1,08	111,25	51,07	739,00	7,23	29,00	78,53	0,49	118,94
P385	28/05/2013	17,00	10,00	ND	6,00	86,00	188,80	7,10	-	2,64	0,20	2,26
P440	06/03/2005	33,00	2,00	ND	19,00	120,00	249,00	8,10	-	2,40	0,09	3,50
P459	07/05/2018	25,52	3,38	1,44	20,57	126,53	236,00	7,48	-	4,50	0,54	1,03
P474	28/03/2019	49,10	2,83	1,84	23,90	130,00	500,00	6,86	36,20	3,50	0,45	95,00
P479	26/11/2018	5,30	0,58	0,48	150,00	61,00	650,00	7,06	18,60	60,00	2,20	141,00
P488	28/03/2019	38,70	0,11	0,65	70,40	67,00	785,00	6,80	25,60	11,00	1,47	196,00
P490	28/11/2018	28,10	2,95	0,51	89,70	90,00	549,00	7,40	22,70	15,00	0,94	167,00
P498	03/11/2010	2,40	0,11	1,00	105,90	44,55	686,00	9,60	22,00	41,89	1,62	114,00

Referências:

Cálcio, magnésio, potássio, sódio, bicarbonato, cloreto, fluoreto e sulfato: mg/l

Condutividade elétrica (CE): $\mu\text{S/cm}$

Temperatura: $^{\circ}\text{C}$

Anexo D – Parâmetros físico-químicos do SASG da Área do Planalto.

	Coleta	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Bicarbonato	CE	pH	Temperatura	Cloreto	Fluoreto	Sulfato
S7	10/06/1995	14,00	3,00	1,80	11,00	73,00	134,90	8,00	-	1,00	0,30	2,60
S8	08/06/1995	16,00	2,00	1,60	11,00	77,00	132,80	7,00	-	2,00	0,20	2,10
S9	19/08/1996	15,00	2,00	0,40	23,00	94,00	185,70	7,90	-	2,00	0,30	1,00
S11	26/11/2018	20,10	7,91	0,24	49,10	110,00	350,00	7,27	23,50	9,50	0,29	50,70
S12	28/11/2018	22,90	2,43	0,60	119,00	83,00	730,00	7,05	24,20	30,00	1,55	211,00
S36	02/09/2015	20,00	1,00	ND	300,00	43,00	1558,00	9,00	-	107,00	2,40	528,00
S37	28/03/2019	10,10	0,51	ND	80,40	40,00	522,00	7,05	25,20	9,00	3,36	175,00
S74	28/11/2018	22,50	2,94	ND	23,70	91,00	258,00	6,80	20,90	5,00	0,33	15,60
S89	28/11/2018	17,90	0,76	0,85	194,00	70,00	940,00	7,27	23,80	37,00	2,36	249,00
S90	28/11/2018	1,59	ND	0,26	110,00	70,00	613,00	6,59	24,30	44,00	1,70	145,00
S93	04/08/2006	23,00	5,00	0,65	12,00	99,00	206,00	7,20	-	1,60	0,10	2,90
S100	23/02/2009	12,90	3,89	0,40	8,30	52,50	140,00	6,75	19,00	6,67	0,19	2,00
S117	14/12/2008	19,00	2,43	1,40	9,25	68,30	152,00	7,17	20,50	4,95	0,26	1,00
S160	20/09/2005	17,40	3,50	0,90	10,00	78,00	158,60	7,30	20,00	1,00	0,30	1,00
S166	10/06/2009	21,00	6,56	1,23	6,00	79,20	149,00	7,07	18,50	7,92	0,14	2,00
S174	02/06/2009	8,89	4,86	1,80	3,80	28,60	77,60	6,55	19,00	6,16	0,30	10,00
S177	21/09/2005	37,20	17,00	1,70	4,55	162,00	284,00	7,05	20,00	8,36	0,23	5,00
S207	18/02/2009	16,97	2,92	1,30	8,70	65,10	168,00	6,90	20,00	8,02	0,08	1,00
S260	26/11/2018	13,40	1,66	0,55	12,80	70,00	175,70	7,32	21,70	4,50	0,20	ND
S261	26/11/2018	13,10	6,04	0,17	70,50	105,00	399,00	6,84	23,20	25,00	0,70	47,60
S264	23/02/2009	19,80	2,67	0,61	10,40	72,50	176,00	7,15	20,00	12,00	0,37	5,00
S267	26/11/2018	12,50	2,07	0,20	78,20	105,00	427,00	7,28	24,90	27,00	0,56	63,60
S270	26/11/2018	0,12	ND	ND	76,90	110,00	373,00	7,68	22,80	15,00	0,64	32,30
S271	26/11/2018	30,90	12,80	ND	19,90	160,00	343,00	7,26	25,40	7,50	0,17	3,57
S275	26/11/2018	11,40	2,39	ND	71,70	123,00	382,00	7,32	25,50	17,00	0,62	32,80
S278	26/11/2018	22,70	6,15	0,47	89,70	125,00	560,00	7,42	24,80	38,00	0,48	103,00
S280	26/11/2018	40,30	17,60	ND	17,70	170,00	432,00	7,41	22,60	25,00	0,13	5,67
S318	30/07/2008	18,00	2,00	0,30	20,00	91,00	198,40	7,80	-	4,10	0,20	2,01
S319	30/07/2008	22,00	3,00	0,30	15,00	93,00	204,00	7,70	-	3,90	0,10	1,84
S328	10/06/2009	15,70	6,80	0,67	10,50	64,90	119,00	7,08	18,00	7,48	0,19	11,00
S334	23/02/2009	17,80	4,86	0,59	8,20	67,20	153,00	7,14	20,00	8,01	0,25	2,00
S343	25/06/2008	22,00	3,00	0,20	14,00	89,00	200,00	7,40	-	3,70	0,10	1,93
S426	09/05/1985	10,00	1,70	1,20	6,00	44,00	94,70	6,20	-	1,00	0,20	1,40
S428	28/09/2005	13,60	3,20	2,50	5,00	58,00	145,10	6,40	18,50	3,00	0,30	12,40
S432	-	10,00	1,20	0,60	31,00	89,00	166,10	8,40	-	4,00	0,40	1,60
S479	28/11/2018	25,80	ND	0,26	78,80	20,00	480,00	6,75	22,40	7,00	1,68	186,00
S535	17/05/1986	13,60	1,60	0,40	29,00	96,00	214,10	7,30	-	6,00	0,70	6,30
S568	27/02/2007	20,00	4,00	0,80	14,00	61,00	210,00	7,50	-	15,00	0,10	8,30
S577	01/09/2004	16,00	2,70	0,20	26,00	99,00	213,00	7,80	18,00	4,00	0,30	4,90
S585	23/05/2007	16,03	2,92	1,79	9,40	79,84	102,20	6,64	-	1,50	0,26	2,73
S628	11/12/1994	18,70	7,40	0,30	9,00	90,00	176,40	7,20	-	3,00	0,20	3,20
S686	10/01/1991	9,80	1,80	2,10	9,00	44,00	96,90	6,90	-	4,00	0,30	5,00
S988	13/11/2008	16,60	5,10	1,46	0,80	65,10	127,00	6,86	20,50	0,43	0,35	2,00
S1011	12/09/2005	10,80	2,90	1,70	2,00	50,00	112,70	6,50	18,00	2,00	0,50	3,50

	Coleta	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	Bicarbonato	CE	pH	Temperatura	Cloreto	Fluoreto	Sulfato
S1025	24/06/2004	18,91	10,64	1,00	8,00	83,17	164,40	7,12	-	10,80	0,27	13,83
S1077	16/12/1985	9,60	2,20	2,00	4,00	38,00	89,80	6,40	-	3,00	0,30	2,80
S1128	12/08/1983	9,60	3,20	2,00	10,00	52,00	107,10	6,80	-	6,00	0,30	3,10
S1133	22/06/1986	10,50	2,90	1,80	2,00	50,00	105,30	6,50	-	2,00	0,30	2,30
S1135	17/06/1989	14,60	2,60	1,20	14,00	76,00	148,40	7,90	-	3,00	0,30	1,40
S1284	13/09/2013	20,00	1,80	0,30	22,00	96,00	226,00	7,80	-	7,00	0,70	2,44
S1285	28/01/2010	22,00	2,00	0,44	18,00	112,00	206,00	7,70	-	3,10	0,50	2,40
S1527	04/07/2013	16,00	5,20	1,20	9,10	85,00	178,60	7,40	-	2,36	0,20	1,84
S1531	16/01/2007	14,00	1,00	0,40	30,00	95,00	254,00	7,60	-	5,60	0,10	1,96
S1532	11/01/2007	5,00	0,80	0,60	30,00	83,00	177,80	7,80	-	2,10	0,11	0,56
S1535	20/06/2013	13,00	1,20	0,27	40,00	116,00	237,00	8,30	-	2,87	0,30	2,72
S1557	26/07/2005	11,27	3,15	0,25	22,79	117,00	263,00	7,65	20,00	8,42	0,17	5,00
S1717	26/11/2018	29,40	10,50	ND	14,00	127,00	304,00	7,38	22,50	8,50	0,06	4,41
S1718	10/03/1993	23,60	4,60	0,40	57,00	122,00	407,00	7,30	21,00	16,00	1,20	44,30
S1800	26/11/2018	23,50	4,00	ND	27,30	115,00	278,00	7,61	26,70	4,50	0,25	11,70
S1802	26/11/2018	22,90	7,64	ND	68,40	145,00	420,00	7,43	22,70	20,00	0,51	31,50
S1803	26/11/2018	10,80	0,31	ND	20,80	67,00	168,10	7,60	24,40	2,50	0,28	3,05
S1862	20/01/1992	18,60	3,00	0,80	12,00	82,00	170,80	7,20	-	3,00	0,30	1,10
S1864	02/10/1989	20,00	6,10	0,60	8,00	85,00	167,60	7,10	-	15,00	0,50	5,80
S1868	15/01/1992	17,40	4,00	2,30	28,00	114,00	244,20	6,30	-	6,00	0,30	2,60
S1873	21/09/1985	24,80	6,80	0,50	4,00	103,00	190,80	7,50	-	5,00	0,30	4,00
S1874	01/04/1992	24,00	4,90	0,60	15,00	129,00	205,70	7,70	-	3,00	0,30	2,50
S1876	16/06/1989	16,00	3,20	0,70	18,00	83,00	159,30	7,80	-	3,00	0,20	3,20
S1912	14/12/2007	6,87	4,37	0,98	42,00	133,00	253,00	7,86	24,00	2,60	0,24	3,00
S1935	23/02/2009	17,80	4,13	1,20	6,70	62,00	158,00	6,78	20,00	11,10	0,20	1,00
S1937	17/04/2009	23,00	4,13	0,23	15,50	107,00	226,00	7,92	-	5,34	0,64	10,00
S1944	03/04/2009	23,00	4,86	0,28	14,90	110,00	229,00	7,82	-	8,45	0,48	7,00
S1945	17/02/2009	21,80	2,19	0,16	18,20	102,00	232,00	7,76	20,00	4,40	1,08	3,00
S1946	13/05/2009	15,35	2,67	0,28	9,50	66,00	120,00	7,68	19,50	8,80	0,45	2,00
S1947	17/02/2009	7,68	0,97	0,42	22,40	74,60	170,00	8,55	21,00	8,90	0,51	1,00
S2072	04/12/2015	7,90	1,60	1,10	16,50	57,00	152,50	6,95	-	5,30	0,25	ND
S2075	28/11/2018	8,06	2,25	2,24	4,35	41,00	126,30	6,78	19,90	4,00	ND	ND
S2117	30/07/2009	14,10	2,86	2,63	7,47	62,20	153,00	6,79	17,00	4,11	0,23	1,37
S2118	30/07/2009	15,20	2,94	2,75	7,62	66,30	156,00	6,57	17,00	3,89	0,24	1,35
S2124	09/09/2009	16,10	9,23	1,06	9,55	94,50	196,00	7,39	18,00	5,72	0,20	2,00
S2131	25/02/2009	21,00	6,32	0,87	7,80	79,80	197,00	7,51	20,00	5,78	0,23	4,00
S2134	02/06/2009	19,40	8,51	1,60	4,70	91,30	157,00	7,47	18,50	3,96	0,34	3,00
S2141	02/06/2009	33,50	13,60	1,40	5,50	131,00	252,00	7,26	18,50	7,48	0,32	15,00
S2143	12/01/2007	17,10	4,47	1,29	4,62	73,00	124,00	7,22	21,30	0,44	0,09	0,15

Anexo E – Razões isotópicas para os poços do SAG e do SASG.

Poço	Sistema Aquífero	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	Grupo
P1	SAG	-25,79	-5,27	C2-SAG
P4	SAG	-31,39	-5,88	C4-SAG
P15	SAG	-31,43	-5,87	C4-SAG
P16	SAG	-33,43	-6,04	C4-SAG
P17	SAG	-25,07	-5,35	C3-SAG
P474	SAG	-28,22	-5,26	C1-SAG
P488	SAG	-31,58	-6,11	C2-SAG
P490	SAG	-25,23	-4,71	C2-SAG
P11	SAG	-35,48	-5,98	C4-SAG
S11	SASG	-24,21	-4,71	C3-SASG
S12	SASG	-27,37	-5,14	C4-SASG
S37	SASG	-29,14	-5,56	C4-SASG
S74	SASG	-27,97	-5,18	C1-SASG
S89	SASG	-28,11	-5,44	C4-SASG
S90	SASG	-35,42	-6,25	C4-SASG
S260	SASG	-27,83	-5,39	C1-SASG
S261	SASG	-29,52	-5,15	C3-SASG
S267	SASG	-29,7	-5,47	C3-SASG
S270	SASG	-32,15	-5,4	C3-SASG
S271	SASG	-25,2	-4,71	C2-SASG
S275	SASG	-26,27	-5,07	C3-SASG
S278	SASG	-26,32	-4,96	C3-SASG
S280	SASG	-25,56	-4,54	C2-SASG
S479	SASG	-33,86	-5,37	C4-SASG
S1717	SASG	-26,46	-4,71	C2-SASG
S1800	SASG	-27,24	-4,96	C1-SASG
S1802	SASG	-26,59	-4,14	C3-SASG
S1803	SASG	-29,93	-5,18	C1-SASG
S2075	SASG	-31,79	-5,27	C1-SASG