



INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
Programa de Pós-Graduação em Geociências

TESE DE DOUTORADO

**HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA DE ÁGUAS COM ALTA  
SALINIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA REGIÃO  
DO ALTO RIO URUGUAI, BRASIL**

Marcos Alexandre de Freitas

Orientador: Ari Roisenberg

Porto Alegre

Novembro de 2016

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

**HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA DE ÁGUAS COM ALTA  
SALINIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NA REGIÃO  
DO ALTO RIO URUGUAI, BRASIL**

MARCOS ALEXANDRE DE FREITAS

ORIENTADOR- Prof. Dr. Ari Roisenberg

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato (UFRGS)

Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva (UFSM)

Prof. Dr. Malva Andrea Mancuso (UFSM)

Tese de Doutorado apresentada como  
requisito parcial para obtenção do  
Título de Doutor em Geociências

Porto Alegre

Novembro de 2016

Freitas, Marcos Alexandre de

Hidrogeoquímica e isotopia de águas com alta salinidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, Brasil . / Marcos Alexandre de Freitas. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. [195 f.] il.

Tese (Doutorado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Ari Roisenberg

1. Sistema Aquífero Serra Geral 2. hidrogeoquímica 3. isótopos 4. recarga ascendente I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/ 2310

*Dedico esse trabalho à Valéria,  
companheira de tantos anos  
e minha grande incentivadora,  
e aos meus saudosos Pais, José e Odila,  
que me ensinaram os valores da vida  
e tanto se esforçaram para eu poder  
estudar.*

## Agradecimentos

Inicialmente quero agradecer a Deus que me possibilitou trilhar os caminhos da vida e me deu saúde e controle emocional para eu chegar até aqui.

Fico grato ao Programa de Pós Graduação em Geociências da UFRGS pela oportunidade de cursar o Doutorado e à CPRM pela confiança depositada neste estudo, liberação parcial para a realização do curso, bem como pela infraestrutura fornecida para os trabalhos de campo. Cabe agradecer à FAPERGS, que possibilitou o financiamento da pesquisa através do edital nº 004/2008. Agradeço também à CORSAN, na figura do geólogo Marcio Klein, pela disponibilização dos dados dos poços e análises físico-químicas. Não posso esquecer de mencionar e saudar os proprietários de poços e às várias estâncias termais da região, que permitiram o acesso aos poços e a coleta de água.

Agradeço ao meu orientador e amigo de longa data, Professor Ari Roisenberg, pela parceria e trabalhos desenvolvidos durante o curso, motivação, sugestões e críticas.

Ao meu amigo e também colega de turma, Professor Pedro Viero, pelos ensinamentos e discussões sobre hidrogeoquímica.

Quero agradecer também ao Andriotti pelas discussões e aprendizado de estatística multivariada, ao Machadinho e Marcelo Goffermann, pelas conversas e debates hidrogeológicos na CPRM, que muito contribuíram para o resultado final desta pesquisa.

Agradeço ao Gustavo Cunha e ao Luis Alberto (Sapo) pela parceria nos exaustivos trabalhos de coleta de água em campo e organização das amostras. Agradeço ao Eng<sup>o</sup> Gary Bitencourt por abrir caminhos para a aquisição de dados e permitir acesso às estâncias termais.

Também fico agradecido ao Laboratório de Geocronologia do IG da UnB e a Alexandra Suhogusoff pela ajuda na realização das análises isotópicas em Brasília.

Agradeço ao Roberto Kirchheim e equipe do SIAGAS pelas pesquisas na base de dados e troca de informações.

Quero agradecer a Patrícia Sotério e ao estagiário Luis Gabriel pela ajuda com as figuras elaboradas, a Marta Rubbo pela ajuda com o *excel*, a Débora Lamberty pela revisão e editoração do texto. Agradeço também ao Diogo Rodrigues, Raquel Binotto, Thiago de Paula e José Kepel pelas dicas e ajuda no *ArcGis*. Cabe ressaltar também o agradecimento a nossa bibliotecária Ana Lúcia pela revisão das citações e referencias bibliográficas deste texto.

E finalmente eu agradeço a Valéria, pelo incentivo e pela paciência de ter me aturado nas fases finais da elaboração desta tese.

*“ Os índios norte americanos consideravam as fontes  
de águas quentes como territórios sagrados,  
onde o grande espírito vivia e  
acreditavam nos poderes miraculosos das  
águas minerais aquecidas.  
Estes locais eram considerados territórios neutros  
onde os guerreiros podiam viajar e  
descansar sem serem molestados por outras tribos.”  
(autor desconhecido)*

## RESUMO

O presente estudo dedicou-se à análise da água subterrânea com alta salinidade no Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, norte/noroeste do Rio Grande do Sul e oeste de Santa Catarina. O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é um aquífero fraturado que compreende rochas vulcânicas basálticas e riolíticas mesozoicas da Bacia do Paraná, recobrando e confinando parcialmente o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que se encontra sobreposto a aquíferos mais profundos (Pré-SAG). O objetivo principal desta pesquisa é aprimorar a compreensão dos fenômenos que regem a interação entre o SASG e os aquíferos sotopostos às rochas vulcânicas (SAG e Pré-SAG) e os seus reflexos na composição química do aquífero fraturado da região. Previamente foi realizada uma Análise Exploratória de Dados de um conjunto de 7.620 poços que continham informações de condutividade elétrica na área de ocorrência do SASG nos dois estados. Condutividades Elétricas superiores a  $378,35\mu\text{S}/\text{cm}$  foram consideradas anômalas e são decorrentes de níveis de salinidade elevados nas águas do SASG, muitas vezes, inviabilizando-as para o consumo humano. Foram amostrados 39 poços do SASG na região em estudo que apresentavam anomalia na condutividade elétrica e 19 poços que captam águas do SAG. As águas foram quimicamente analisadas em relação aos elementos maiores, elementos-traço e isótopos estáveis ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  e  $^{13}\text{C}$ ). Os dados físico-químicos obtidos foram processados através de Análise de Componentes Principais e posteriormente por Análise de Agrupamentos. A análise tectônica da área realizada através da interpretação de imagens de satélite permitiu constatar que o pacote vulcânico foi mais afetado nas direções N-60 a 80-W, N-70 a 80-E e EW. A salinidade das águas mostrou-se mais elevada nos poços influenciados por lineamentos morfoestruturais de direções N-30 a 45-W, N-15-30-W, N-30-45-E, N-60-75-E e E-W. As águas termais no SASG ocorrem somente a oeste da zona de falha Lancinha-Cubatão e na zona de influência do lineamento do Rio Uruguai. O estudo estatístico de agrupamento discriminou quatro grupos de águas, que possuem clara evolução hidrogeoquímica. Nesta evolução, a condutividade elétrica, as concentrações de cloreto, potássio, sódio, sais dissolvidos, sulfato e estrôncio sofrem incremento, enquanto o pH e o carbonato diminuem. A tipologia química das águas aponta para tipos bicarbonatados e sulfatados sódicos nos grupos I e II, enquanto o grupo III mostra águas sulfatadas sódicas a cálcicas. O grupo IV exhibe águas cloretadas sódicas e cálcicas. As águas do grupo I estão intimamente relacionadas com a recarga ascendente do SAG. No grupo II ocorrem processos de mistura de águas do SASG com as águas do Pré-SAG. Nos grupos III e IV torna-se evidente a recarga ascendente a partir das Unidades Hidroestratigráficas Rio do

Rasto e Teresina. A aplicação do geotermômetro de sílica para as águas termais demonstraram a circulação da água nos poços estudados atinge profundidades máximas da ordem de 3,0 km e, em sua maioria, situa-se entre 1,1 e 1,5km. O gradiente geotérmico médio calculado para a área de estudo é de 23,5°C/km. Os mecanismos e elementos apresentados auxiliam como guias para decisões de gerenciamento do SASG na região.

## ABSTRACT

This study was dedicated to the analysis of groundwater with high salinity in the Serra Geral Aquifer System at the Upper Uruguai River region, laying on the northwest fringe and west side, respectively, of the Rio Grande do Sul and Santa Catarina States. The Serra Geral Aquifer System (SGAS) is a fractured aquifer comprising basaltic and rhyolitic mesozoic volcanic rocks of the Paraná Basin. These volcanic rocks cover the Guarani Aquifer System (GAS) and the underlying superimposed on deeper Permian aquifers. The main objective of this research is to better define the hydrogeochemical interactions between the SGAS and the underlying aquifers. An exploratory data analysis of a set of 7,260 water wells containing information of the electrical conductivity of the SGAS was carried out at the whole study region. Electrical conductivities above 378.35 $\mu$ S/cm were considered anomalous and are due to high levels of salinity in the waters of SGAS. These waters are almost unsuitable for human consumption. A total of 39 water wells bearing anomalous electrical conductivities of the SGAS aquifer and another 19 water wells from the GAS aquifers were sampled. The groundwater set was then analyzed for the major elements, trace elements and stable isotopes ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$ ). The physicochemical data were processed using principal component analysis and cluster analysis. Tectonic analysis of the area were performed using satellite image interpretation techniques. Their results confirmed that the volcanic package was most affected in the N-60 a 80-W, N-70 a 80-E e EW directions. The salinity of the groundwater is greater in the water wells influenced by lineaments at N-30 a 45-W, N-15-30-W, N-30-45-E, N-60-75-E and EW directions. It was shown that the hot springs within the SGAS only occur at west side of the Lancinha-Cubatao fault zone and the zone of influence of the lineament of the Uruguay River. Through a statistical study four water groups were separated, according to their hydrogeochemical evolution. Along this trend, electrical conductivity, chloride, potassium, sodium, sulfate and strontium concentrations get higher while pH and carbonates values get lower. In the groups I and II the chemical type of water is sodium-bicarbonate and sodium-sulphate, while the group III shows sodium-sulphate and calcium-sulphate types. The group IV is represented by sodium-chloride and calcic-chloride types. The waters of the group I are closely related to the ascendant water fluxes from the GAS. At the group II, water contents reveal the mixture with groundwater from the GAS and Permian aquifers. At the groups III and IV there is an evident upward recharge from the hydrostratigraphic units called Rio do Rasto and Teresina. The application of silica geothermometer to the thermal waters showed that the water circulation reaches maximum depth of 3.0 kilometers and, in most

cases, are between 1.1 and 1.5 km. The average geothermal gradient calculated for the study area is 23.5°C / km. The hydrogeochemistry mechanisms presented in this research are helpful tools for the SGAS management.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. JUSTIFICATIVA.....	21
3. OBJETIVOS.....	22
4. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA.....	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
5.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E COLETA DE DADOS .....	25
5.2. BASE DE DADOS DE POÇOS TUBULARES.....	25
5.3. COLETA DE ÁGUA E MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS .....	26
5.4. ANÁLISE DE LINEAMENTOS.....	32
5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	33
5.5.1. Análise Exploratória de Dados .....	34
5.5.2. Análise Multivariada dos Parâmetros Físico-químicos e Isotópicos.....	35
5.6. TRATAMENTO DE DADOS HIDROGEOQUÍMICOS .....	37
6. CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRUTURAL REGIONAL .....	37
7. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL .....	41
7.1. SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL .....	42
7.2. SISTEMA AQUÍFERO GUARANI.....	46
7.2.1. Unidade Hidroestratigráfica Botucatu.....	46
7.2.2. Unidade Hidroestratigráfica Piramboia.....	48
7.3. PRÉ-SAG.....	49
7.3.1. Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto .....	50
7.3.2. Unidade Hidroestratigráfica Teresina .....	52
7.3.3. Unidade Hidroestratigráfica Serra Alta.....	54
7.3.4. Unidade Hidroestratigráfica Irati .....	54
7.3.5. Unidade Hidroestratigráfica Rio Bonito .....	55
8. ESTADO DA ARTE DOS ASPECTOS HIDROGEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS SERRA GERAL E GUARANI E DE SUAS ÁGUAS TERMAIS .....	57
8.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	57
8.2. HIDROGEOQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL .....	57
8.3. HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI .....	60
9. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS .....	70
9.1. INTRODUÇÃO .....	70
9.2. MODELO CONCEITUAL E HIPÓTESE DA PESQUISA.....	70
9.3. AVALIAÇÃO REGIONAL DOS VALORES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA AS ÁGUAS DO SASG.....	74
9.4. ANÁLISE DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS.....	77

9.5. SUPERFÍCIE LIMITE DE ARTESIANISMO DO SAG E SUAS IMPLICAÇÕES NO SASG .....	83
9.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADADE POÇOS DO SAG E DO SASG COM CONDUCTIVIDADE ELÉTRICA ANÔMALA.....	84
9.6.1. Considerações Iniciais .....	84
9.6.2. Variáveis utilizadas .....	87
9.6.3. Análise de Componentes Principais SAG.....	98
9.6.4. Análise de Componentes Principais SASG.....	105
9.6.5. Análise de Componentes Principais Integrada (SAG+SASG).....	113
9.6.6. Análise de Agrupamento.....	121
9.7. HIDROGEOQUÍMICA E CARACTERÍSTICAS ISOTÓPICAS DOS POÇOS ANALISADOS .....	125
9.7.1. Introdução .....	125
9.7.2. Descrição dos Grupos Estatísticos Obtidos na Análise de Agrupamento .....	125
9.7.3. Evolução Hidrogeoquímica.....	132
9.7.4. Cálculo do Índice de Saturação.....	144
9.7.5. Especiação Química da Água de Acordo com o Modelamento Geoquímico .....	150
9.7.6. Análise dos Isótopos Estáveis .....	154
9.8. AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA TERMAL ATRAVÉS DO GEOTERMÔMETRO DE SÍLICA .....	160
9.8.1. Introdução .....	160
9.8.2. Geotermômetros.....	160
9.8.3. Gradiente geotérmico .....	166
9.8.4. Profundidade máxima de circulação das águas .....	168
10. CONCLUSÕES .....	173
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	175

## Lista de Figuras

- Figura 1. Mapa de localização geográfica da área de estudo. .... 24
- Figura 2. Precipitação pluviométrica média anual segundo Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011). .... 25
- Figura 3. Poço termal do SASG amostrado para pesquisa, onde manteve-se sua identificação original vinculada ao cadastro nacional do SIAGAS da CPRM. Nota-se a sigla JQ-504 pintada na base do abrigo do quadro de comando. .... 27
- Figura 4. Equipamentos utilizados para a coleta e análise *in situ*. .... 29
- Figura 5. Expurga para coleta de água do poço JQ-499 em Vicente Dutra,RS..... 29
- Figura 6. Medição de temperatura da água (57° C)no poço JP-714 que capta o SAG na Linha São Luís São Lourenço do Oeste, SC. .... 30
- Figura 7. Bomba de vácuo manual e conjunto com filtro de membrana de acetato de celulose 0,45 µm para águas destinadas a análises de cátions e metais dissolvidos.. 30
- Figura 8. Amostragem em poço jorrante IN-710 em União do Oeste, SC..... 31
- Figura 9. Bombeamento visando à coleta de água no poço IH-941 da Thermas Machadinho, RS..... 31
- Figura 10. Traçado de lineamentos morfoestruturais em imagem de relevo sombreado na escala 1:500.000, segundo o método da não inferência (Schuck *et al.*, 1986).33
- Figura 11. *Boxplot* com os parâmetros utilizados na análise exploratória de dados (adaptado de Andriotti, 2013). .... 35
- Figura 12. Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná (Milani, 1997). .... 38
- Figura 13. Principais estruturas regionais da Bacia do Paraná (ZALÁN *et al.*, 1990; ASMUS, 1975) e distribuição espacial do SAG (modificado de Machado, 2005). ... 40
- Figura 14. Área de ocorrência do SASG e principais sistemas aquíferos na Bacia do Paraná. .... 42
- Figura 15. Esquema de modelo conceitual dos mecanismos de recarga do SASG, sua relação com os aquíferos SAG e Pré-SAG, bem como os tipos hidrogeoquímicos resultantes (Modificado de Machado e Freitas, 2000). .... 43
- Figura 16. Arenitos interderrames vulcanogênicos, muito friáveis, situados em altitude de 725 metros, em Cordilheira Alta, SC, com blocos arredondados de rocha vulcânica. .... 45
- Figura 17. Mapas de espessura das formações Piramboia (a) e Botucatu (b) na Bacia do Paraná, adaptado de Soares *et al.* (2008). Na unidade Piramboia estão representados os domínios de interdunas secas e úmidas. .... 49
- Figura 18. Perfil geofísico com delimitação das camadas arenosas e aquíferas no poço profundo do Itá Thermas Resort & Spa, SC (Fonte: MACHADO, 2013)... 51
- Figura 19. Mapa de localização dos poços perfurados para pesquisa de hidrocarbonetos presentes na região da área de estudo (Banco de Dados BDEP-ANP). .... 52
- Figura 20. Mapa de isópacas do Permiano superior da Bacia do Paraná incluindo as unidades Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (adaptado de Zalán *et al.* , 1990). .... 55

Figura 21. Mapa das principais Zonas Hidroquímicas do SAG (LEBAC, 2008). .....	63
Figura 22. Modelo de evolução hidrogeoquímica do SAG proposto por Manzano e Guimaraens (2008).....	64
Figura 23. Localização das seções hidrogeoquímicas (T1 a T8) avaliadas por Manzano e Guimaraens (2008). Modificado de LEBAC (2008). .....	65
Figura 24. Relação $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas do SAG. (A) Zona Norte e (B) Zona Sul. Modificado de Aravena (2008) apud LEBAC (2008).....	68
Figura 25. Mapa de concentrações de $\delta^{13}\text{C}$ nas águas do SAG (LEBAC, 2008).....	69
Figura 26. Mapa de distribuição de $^{14}\text{C}$ nas águas do SAG. (LEBAC, 2008).....	69
Figura 27. Hidrogeologia simplificada da área (Modificado de CPRM, 2014) com poços profundos que foram perfurados para pesquisa de hidrocarbonetos (BDEP-ANP) e para captação de água principalmente do SAG. ....	72
Figura 28. Percentual dos intervalos de entrada de água nos poços que captam o SASG no oeste de Santa Catarina (Adaptado de Freitas <i>et al.</i> , 2003). ....	73
Figura 29. Diminuição da produtividade dos poços que captam exclusivamente águas do SASG no oeste de Santa Catarina com o incremento da profundidade (Adaptado de Freitas <i>et al.</i> , 2003).....	73
Figura 30. Histograma da CE medida <i>in loco</i> em 7.620 poços tubulares que captam o SASG nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. ....	76
Figura 31. Poços tubulares que captam o SASG classificados conforme as classes de CE determinadas na AED: C1(a), C2(b), C3(c) e C4(d). ....	78
Figura 32. Lineamentos morfoestruturais traçados na escala 1:500.000.....	79
Figura 33. Comparação entre a densidade de lineamentos morfoestruturais e as estruturas regionais presentes na área de estudo. ....	80
Figura 34. Condutividade elétrica média dos poços do SASG pertencentes à classe C1 e as direções dos lineamentos morfoestruturais.....	81
Figura 35. Mapa de densidade de lineamentos de direção NE e poços da classe C1 de CE( $\leq 378,35 \mu\text{S/cm}$ ).....	82
Figura 36. Mapa de densidade de lineamentos de direção NW e poços da classe C1 de CE( $\leq 378,35 \mu\text{S/cm}$ ).....	82
Figura 37. Áreas com potencial artesianismo do SAG derivadas do cruzamento entre a superfície potenciométrica do SAG (LEBAC, 2008) e o modelo digital do terreno. ....	83
Figura 38. Poços com anomalia de CE no SASG que interceptam a superfície potenciométrica do SAG (modificada de LEBAC, 2008). Destes 167 poços, 39 foram amostrados para análise físico-química e isotópica. ....	85
Figura 39. Poços amostrados para análise físico-química e isotópica na área de estudo. ...	86
Figura 40. Distribuição espacial do parâmetro temperatura nos poços amostrados.....	87
Figura 41. Distribuição espacial do parâmetro pH nos poços amostrados.....	88
Figura 42. Distribuição espacial da Alcalinidade Total nos poços amostrados. ....	88
Figura 43. Distribuição espacial do $\text{Ca}^{2+}$ nos poços amostrados.....	89

Figura 44. Distribuição espacial do $\text{Cl}^-$ nos poços amostrados. ....	89
Figura 45. Distribuição espacial do Fe total nos poços amostrados. ....	90
Figura 46. Distribuição espacial do $\text{F}^-$ nos poços amostrados. ....	90
Figura 47. Distribuição espacial do $\text{Mg}^{2+}$ nos poços amostrados. ....	91
Figura 48. Distribuição espacial do $\text{K}^+$ nos poços amostrados. ....	91
Figura 49. Distribuição espacial da $\text{SiO}_2$ nos poços amostrados. ....	92
Figura 50. Distribuição espacial do $\text{Na}^+$ nos poços amostrados. ....	92
Figura 51. Distribuição espacial do $\text{SO}_4^{2-}$ nos poços amostrados. ....	93
Figura 52. Distribuição espacial do $\text{Al}^{3+}$ nos poços amostrados. ....	93
Figura 53. Distribuição espacial do $\text{B}^{3+}$ nos poços amostrados. ....	94
Figura 54. Distribuição espacial do $\text{Ba}^{2+}$ nos poços amostrados. ....	94
Figura 55. Distribuição espacial do $\text{P}^{5+}$ nos poços amostrados. ....	95
Figura 56. Distribuição espacial do $\text{Sr}^{2+}$ nos poços amostrados. ....	95
Figura 57. Distribuição espacial da razão isotópica de $^2\text{H}$ . ....	96
Figura 58. Distribuição espacial da razão isotópica de $^{18}\text{O}$ . ....	96
Figura 59. Representação gráfica dos <i>loadings</i> das duas primeiras componentes principais do SAG. ....	101
Figura 60. Representação gráfica dos escores das duas primeiras componentes principais. ....	102
Figura 61. Mapa de escores fatoriais da 1ª componente principal nas amostras coletadas no SAG com a devida superfície potenciométrica. ....	103
Figura 62. Mapa de escores fatoriais da 2ª componente principal nas amostras coletadas no SAG com a devida superfície potenciométrica. ....	104
Figura 63. Representação gráfica dos <i>loadings</i> das duas primeiras componentes principais do SASG. ....	108
Figura 64. Representação gráfica dos <i>scores</i> das duas primeiras componentes principais. ....	109
Figura 65. Mapa de escores fatoriais para a 1ª componente principal do SASG. ....	111
Figura 66. Mapa de escores fatoriais para a 2ª componente principal do SASG. ....	112
Figura 67. Representação gráfica dos <i>loadings</i> das duas primeiras componentes principais da análise integrada SAG+SASG. ....	115
Figura 68. Representação gráfica dos <i>scores</i> das duas primeiras componentes principais na análise integrada SAG+SASG. ....	116
Figura 69. Mapa de escores fatoriais para a 1ª componente principal do SAG+SASG. ....	117
Figura 70. Mapa de escores fatoriais para a 2ª componente principal do SAG+SASG. ....	118
Figura 71. Dendrograma resultante da análise de agrupamento identificando os quatro grupos hidrogeoquímicos para o corte definido. ....	122
Figura 72. Distribuição espacial dos grupos hidrogeoquímicos obtidos na análise de agrupamento. ....	123

Figura 73. <i>Boxplots</i> do pH (a), CE (b), STD (c), Alcalinidade Total (d) e flúor(e) nos quatro grupos hidrogequímicos.....	130
Figura 74. <i>Boxplots</i> dos teores de $\text{HCO}_3^{2-} + \text{CO}_3^-$ (a), $\text{SO}_4^{2-}$ (b), $\text{Cl}^-$ (c), $\text{Ca}^{2+}$ (d) $\text{K}^+$ (e) e $\text{Na}^+$ (f) nos quatro grupos hidrogequímicos.....	131
Figura 75. Diagrama de Piper dos grupos hidroquímicos discriminados na análise de agrupamento.....	132
Figura 76. Diagramas binários entre os íons sódio (a), sulfato (b) e cloreto (c) e STD em meq/L. Nota-se que estes elementos são os que contribuem de forma mais significativa para a evolução geoquímica das águas do grupo I para o Grupo IV. ....	134
Figura 77. Mediana das razões iônicas em cada grupo hidrogequímico. ....	135
Figura 78. Fluxograma da técnica da interpretação da qualidade da água para determinação do balanço de massa simplificado (adaptado de Hounslow, 1995). ....	137
Figura 79. Diagrama entre a relação $\text{Na}^+ / \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ e o total em meq/L para os grupos hidrogequímicos estatisticamente estabelecidos.....	138
Figura 80. Relação entre $\text{Na}^+$ e $\text{Cl}^-$ nas águas da área de estudo. ....	139
Figura 81. Diagrama binário $\text{Ca}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-}$ e a linha de dissolução de gipsita. ....	140
Figura 82. Diagrama $\text{rHCO}_3^- / \text{SiO}_2$ vs STD em meq/L. ....	141
Figura 83. Diagrama da razão $\text{SiO}_2 / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ vs STD (meq/L). ....	142
Figura 84. Razão $\text{Cl}^- / \text{Br}^-$ vs $\text{Cl}^-$ (mg/L) para os quatro grupos de água da área de estudo. .	143
Figura 85. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo I. ....	147
Figura 86. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo II. ....	147
Figura 87. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo III. ....	148
Figura 88. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo IV. ....	149
Figura 89. Comportamento do índice de saturação vs condutividade elétrica para os grupos hidrogequímicos: (a) IS calcita, (b) IS gipsita. ....	150
Figura 90. Diagrama $\delta^2\text{H} \times \delta^{18}\text{O}$ para todas as amostras pertencentes aos quatro grupos hidrogequímicos e as retas meteóricas locais mais próximas da área de estudo e da reta Global. ....	156
Figura 91. Variação do $\delta^{13}\text{C}$ nos compostos naturais que possuem carbono em sua composição (modificado de Clark & Fritz, 1999). ....	157
Figura 92. Diagrama binário entre a salinidade das águas, representada pelo STD em meq/L, e o $\delta^{13}\text{C}$ . ....	158
Figura 93. Relação inversa entre o $\delta^{13}\text{C}$ e o índice de saturação da calcita nas águas do Grupo III do SASG. ....	159
Figura 94. Curvas de solubilidade do quartzo (A) e da sílica amorfa (C) em função da temperatura na pressão de vapor da solução. A curva B mostra a concentração de sílica em solução após um resfriamento adiabático até a temperatura de 100 °C, a partir de uma solução inicialmente em equilíbrio como quartzo (modificado de Fournier & Rowe, 1966). ....	162

Figura 95. Variação da solubilidade da sílica amorfa e do quartzo, em água pura a 25 °C, em função do pH (Hindi, 2007). .....	163
Figura 96. Relação entre a profundidade do topo do SAG e a temperatura da água medida na boca dos poços. ....	166
Figura 97. Gráfico de dispersão entre as temperaturas calculadas pelo geotermômetro de sílica e as temperaturas da água medidas na boca dos poços. ....	168
Figura 98. Estimativa da profundidade de circulação das águas subterrâneas e respectivas unidades hidroestratigráficas atingidas. ....	172

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Pontos amostrados para análise físico-química e isotópica.....	27
Tabela 2. Parâmetros analisados e respectivos métodos analíticos.....	28
Tabela 3. Limites de detecção adotados pelo laboratório da AcmeLabs.....	32
Tabela 4. Informações da unidade hidroestratigráfica Rio do Rasto em poços de pesquisa para hidrocarbonetos (Petrobras e Paulipetro) na região da área em estudo. Fonte BDEP-ANP.....	53
Tabela 5. Resultado analítico de água da unidade hidroestratigráfica Rio Bonito na profundidade entre 2.528 e 2.569 metros (Fonte BDEP-ANP). .....	56
Tabela 6. Fácies hidroquímicas do SAG identificadas nas seções segundo Manzano e Guimaraens (2008).....	66
Tabela 7. Estatística descritiva da CE medida em campo nos poços que captam o SASG. 75	
Tabela 8. Classes de valores da AED para as variável e CE medida em campo nos poços que captam o SASG.....	76
Tabela 9. Características amostrais das 19 amostras de água coletadas no SAG.....	97
Tabela 10. Características amostrais das 39 amostras de água coletadas no SASG com anomalia em relação a CE.....	98
Tabela 11. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SAG. ....	99
Tabela 12. Matriz de <i>loadings</i> das componentes principais para cada variável do SAG... 100	
Tabela 13. Escores fatoriais dos poços que captam água do SAG. ....	105
Tabela 14. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SASG.....	106
Tabela 15. Matriz de <i>loadings</i> das componentes principais das variáveis do SASG.....	107
Tabela 16. Escores fatoriais das componentes principais do SASG. ....	110
Tabela 17. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SAG+SASG.113	
Tabela 18. Matriz de <i>loadings</i> das componentes principais das variáveis da análise integrada SAG+SASG.....	114
Tabela 19. Escores fatoriais das componentes principais do SAG+SASG. ....	119
Tabela 20. Comparação entre os <i>loadings</i> das variáveis das três primeiras componentes principais resultantes das ACPs realizadas para o SAG, SASG e SAG+SASG. ....	121
Tabela 21. Estatísticas dos principais parâmetros físico-químicos nos grupos derivados da análise de agrupamento.....	124
Tabela 22. Poços do Grupo I . ....	126
Tabela 23. Poços do Grupo II.....	127
Tabela 24. Poços do Grupo III. ....	128
Tabela 25. Poços do Grupo IV. ....	129
Tabela 26. Índice de Saturação dos minerais calculados para os grupos hidrogeoquímicos.145	

Tabela 27. Geotermômetro de sílica para as águas termais da área de estudo. ....	165
Tabela 28. Dados da espessura de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e temperatura da água em poços que captam o SAG.....	167
Tabela 29. Temperatura da água no aquífero calculada pelo geotermômetro de sílica e profundidade máxima de circulação nos poços termais. ....	170

## **Lista de Símbolos e Convenções**

<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo
<b>BDEP</b>	Banco de Dados de Exploração e Produção
<b>CASAN</b>	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
<b>CE</b>	Condutividade elétrica
<b>CIDASC</b>	Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina
<b>CORSAN</b>	Companhia Riograndense de Saneamento
<b>CPRM</b>	Serviço Geológico do Brasil
<b>DNPM</b>	Departamento Nacional de Produção Mineral
<b>GEF</b>	Global Environment Facility
<b>GNIP</b>	Global Network of Isotopes in Precipitation
<b>LEBAC</b>	Laboratório de Estudos e Bacias
<b>PETROBRAS</b>	Petróleo Brasileiro S/A
<b>SAG</b>	Sistema Aquífero Guarani
<b>SASG</b>	Sistema Aquífero Serra Geral
<b>SIAGAS</b>	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas da CPRM
<b>STD</b>	Sais totais dissolvidos
<b>SUDERHSA</b>	Superintendência de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Paraná

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Alto Rio Uruguai, que abrange o norte/noroeste do Estado do Rio Grande do Sul e oeste catarinense, tem sua economia e desenvolvimento social calcados principalmente na agroindústria, o que determina forte dependência das águas subterrâneas. A intensa atividade agrícola e pecuária, que fora realizada de modo não sustentável nos últimos setenta anos, resultou no desmatamento e na contaminação dos mananciais superficiais, principalmente por dejetos de suínos e defensivos agrícolas. Tal panorama levou o poder público a promover, entre outras medidas emergenciais, programas de perfuração de poços visando incrementar a oferta de água para a região. Desta maneira as águas subterrâneas passaram a assumir o papel alternativo às águas superficiais poluídas e milhares de poços foram perfurados, principalmente no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG).

O SASG desenvolve-se nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, que aflora praticamente em toda a Bacia do Paraná, possuindo grande importância hidrogeológica decorrente da elevada explotabilidade, aliada à captação de água subterrânea a um custo reduzido. Os poços, de modo geral, suprem satisfatoriamente as comunidades rurais, indústrias e até sedes de pequenos municípios.

Já o Sistema Aquífero Guarani-SAG, sotoposto ao SASG, é explotado através de pouco mais de trinta poços na região, para aproveitamento turístico em balneários hidrotermais e para auxiliar no abastecimento público de algumas cidades.

Condições potenciométricas e estruturas tectônicas de grande porte permitem a interconexão dos dois sistemas aquíferos, que passam a funcionar como um sistema integrado em algumas regiões.

As características hidroquímicas do SASG vêm sendo estudadas através de metodologias clássicas de tratamento de dados em análises químicas de cátions e ânions maiores, entre outros, utilizando diagramas hidroquímicos, por vários autores dentre os quais Fraga (1986); Rebouças e Fraga (1988); Lisboa (1996); Machado e Freitas (2000); Freitas *et al.* (2002); Reginato e Strieder (2006); Nanni (2008); Freitas *et al.* (2011); Freitas *et al.* (2012); Reginato *et al.* (2013).

## 2. JUSTIFICATIVA

O SASG ainda carece de melhor entendimento, havendo necessidade de estudos de hidrogeoquímica e isotopia que tragam elementos para embasar o conhecimento sobre a

dinâmica, recarga, descarga, interação com outros sistemas aquíferos e sua reação aos fatores antrópicos, como superexploração e contaminação. Este estudo é dedicado a estabelecer e interpretar as principais características hidrogeoquímicas do SASG sob o ponto de vista regional, traçando um paralelo com a tectônica rígida e estabelecendo a influência das estruturas mais importantes sobre este sistema fraturado, o que é de fundamental importância para a gestão pública do recurso hídrico subterrâneo.

### 3. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é contribuir para a compreensão dos fenômenos que regem a interação entre o SASG e os aquíferos sotopostos (Sistema Aquífero Guarani/SAG e Aquíferos Permianos) e seus reflexos na composição química do aquífero fraturado.

A hipótese está fundamentada na salinização das águas do SASG por recarga ascendente, através de estruturas tectônicas em condições hidráulicas favoráveis, derivada das formações geológicas sotopostas ao Grupo Serra Geral na Bacia do Alto Rio Uruguai, noroeste do Estado do Rio Grande do Sul e oeste do Estado de Santa Catarina.

Os objetivos específicos a serem alcançados nesse estudo são:

- Definição regional dos valores anômalos e o *background* de salinidade das águas do SASG;
- verificar o padrão estrutural regional da área e sua influência sobre o SASG;
- definir os tipos hidrogeoquímicos do SASG e do SAG na região em estudo;
- discutir o modelo hidrogeoquímico das águas do SASG e do SAG;
- caracterizar a composição isotópica do SASG e do SAG na região em estudo;
- definir a distribuição espacial dos tipos hidrogeoquímicos definidos no estudo;
- subsidiar os estudos sobre a origem das águas com alta salinidade do SASG.

A fim de se alcançar os objetivos propostos esta tese está estruturada do seguinte modo:

O capítulo 1 faz uma breve descrição da área de estudo e contextualiza a relevância das águas subterrâneas como fonte de abastecimento alternativo às águas superficiais muito contaminadas. Também são tecidas considerações a cerca do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) da sua interação com aquíferos sotopostos.

O capítulo 2 apresenta a justificativa da pesquisa, enquanto que o capítulo 3 descreve os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 4 trata da localização e das características climáticas gerais da área de estudo.

O capítulo 5 traz um panorama dos materiais e da metodologia utilizados, enfocando a pesquisa bibliográfica e coleção de dados existentes, coleta de água, medição dos parâmetros físico-químicos, traçado e análise de lineamentos morfo-estruturais, análise estatística e tratamento de dados hidrogeoquímicos.

O capítulo 6 apresenta um referencial teórico sobre os contextos geológico e estrutural regionais da Bacia do Paraná, onde a área de estudo está inserida.

O capítulo 7 traz uma revisão conceitual em relação ao comportamento hidrogeológico das principais unidades hidroestratigráficas da Bacia do Paraná e sua influência na hidrogeoquímica da área pesquisada.

O capítulo 8 apresenta uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos sobre a hidrogeoquímica e isotopia das águas relacionadas aos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Sistema Aquífero Guarani na Bacia do Paraná.

O capítulo 9, que refere-se ao estudo de caso, começa com a proposição do modelo conceitual da hidrogeologia na área de estudo e a hipótese da pesquisa. Após é realizada uma descrição resumida do arcabouço hidrogeológico juntamente com os dados de poços utilizados e suas principais características. Este capítulo também aborda os resultados da análise exploratória de dados no SASG, na área de sua ocorrência nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, utilizando as medidas de campo de condutividade elétrica da água. Posteriormente a análise de lineamentos morfoestruturais e sua relação com a hidrogeoquímica é avaliada de modo conjunto com a superfície potenciométrica do SAG. Os resultados analíticos nas águas dos poços do SAG e SASG são submetidos às técnicas de estatística multivariada, modelo hidrogeoquímico e interpretação de dados de isótopos estáveis, para validar o modelo conceitual hipotético apresentado. Finalmente são discutidos o gradiente geotérmico para a área de estudo, o geotermômetro de sílica e sua aplicabilidade para avaliar a profundidade da circulação da água termal.

No capítulo 10 são tecidas as considerações finais e conclusões da pesquisa, bem como recomendações a estudos futuros, enquanto que o último capítulo lista todas as bibliografias consultadas e citadas.

#### 4. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

A área objeto da pesquisa encontra-se na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Uruguai (Figura 1) perfazendo o norte/noroeste do Rio Grande do Sul e Oeste de Santa Catarina, abrangendo o território de 240 municípios. O anexo I contém um mapa com as principais sedes municipais relacionadas nesta pesquisa em conjunto com o modelo digital do terreno e a principal rede hidrográfica.

De acordo com o Atlas Climatológico do Brasil (CPRM, 2011), o clima na região em estudo é classificado, segundo a metodologia de Koeppen, em Cfa (Clima Subtropical-mesotérmico úmido e verão quente). No setor nordeste da área, onde predominam altitudes mais elevadas, o clima é do tipo Cfb (Clima Temperado-mesotérmico úmido e verão ameno).

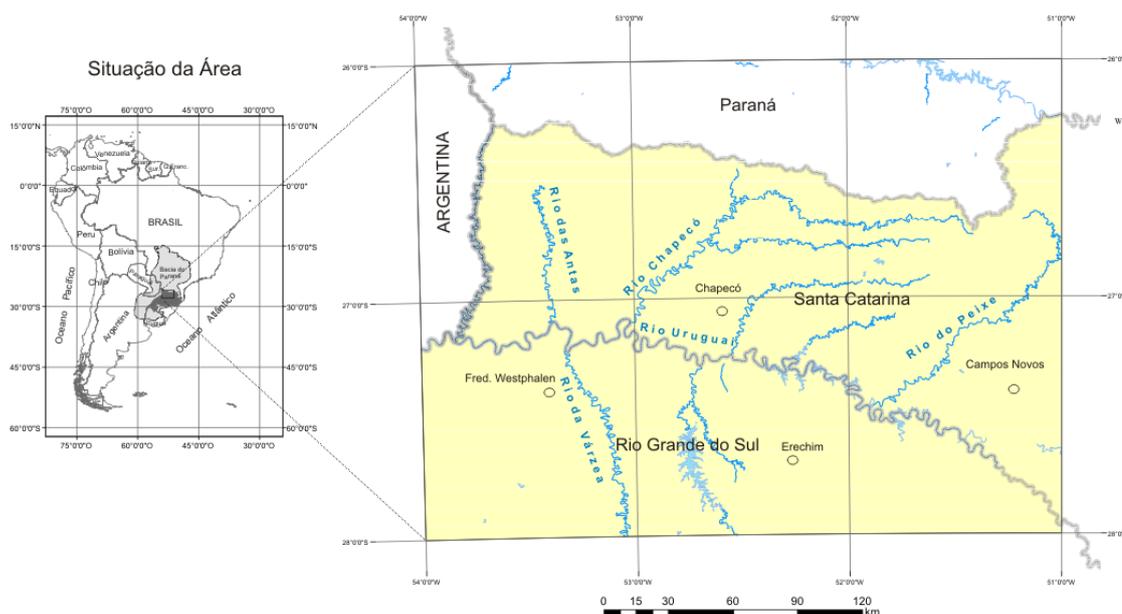


Figura 1. Mapa de localização geográfica da área de estudo.

Segundo o Atlas Pluviométrico do Brasil da CPRM, a precipitação pluviométrica anual média, para o período hidrológico representativo de 1977 - 2006, varia de 1.800 a 2.100 mm anuais (Figura 2) com os meses mais chuvosos ocorrendo entre maio e outubro.

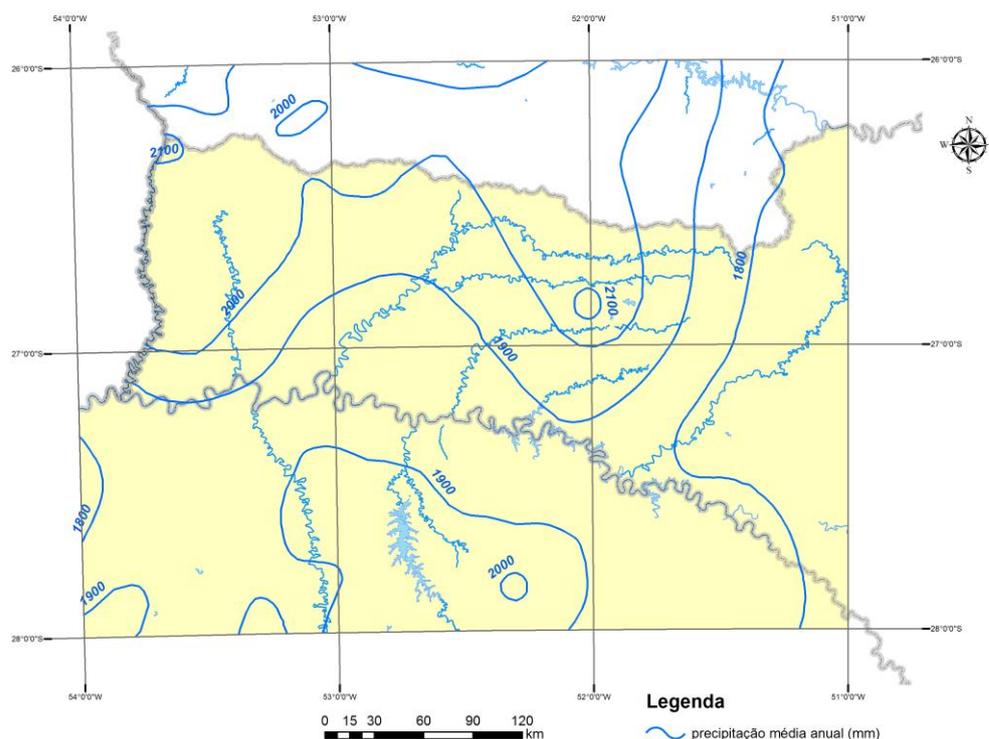


Figura 2. Precipitação pluviométrica média anual segundo Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E COLETA DE DADOS

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo principal a compilação bibliográfica e dos trabalhos de cartografia geológica existentes na área de abrangência dos estudos da tese, particularmente do comportamento hidrogeológico e hidrogeoquímico desta porção da bacia. Foram levantados materiais bibliográficos e dados pré-existentes, referentes à área de estudo, aos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, no que se refere aos seguintes temas: base cartográfica, mapas geológicos, mapas hidrogeológicos, mapas hidroquímicos, dados de poços, fotografias aéreas, imagens de sensoriamento remoto, estratigrafia e tectônica.

### 5.2. BASE DE DADOS DE POÇOS TUBULARES

Para realizar este estudo foram compilados dados existentes de poços tubulares profundos construídos pela Companhia Riograndense de Saneamento-CORSAN, pelo

Programa de Açudes e Poços da Secretaria de Obras Públicas, pela Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina-CIDASC e empresas privadas de perfuração de poços. Tais informações integram o banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS mantido pela CPRM-Serviço Geológico do Brasil.

Também utilizou-se o Banco de Dados de Exploração e Produção BDEP da ANP para entendimento da estratigrafia da Bacia do Paraná na área de estudo.

Os dados georreferenciados relacionados aos poços no SASG do Rio Grande do Sul e Santa Catarina contêm idealmente informações sobre litologias atravessadas durante a perfuração, espessura do manto de alteração, nível estático, nível dinâmico, vazão, rebaixamento, capacidade específica, entradas de água e dados construtivos. Em 3.100 poços, da área de estudo, a CPRM realizou em campo medidas de temperatura do ar e da água, pH e condutividade elétrica.

A maioria dos poços utilizados na pesquisa está identificada com a sigla do cadastro nacional utilizada pela CPRM no SIAGAS e composta por cinco caracteres alfanuméricos, que foram mantidos nesta pesquisa (Anexo II). Um exemplo dessa identificação é o poço JQ-504, localizado no balneário municipal do Prado em Vicente Dutra-RS (Figura 3). Em poços que não fazem parte do SIAGAS adotou-se o nome do local abreviado ou sua sigla original, como por exemplo Cascata Nazzari, VDF (Fonte Vicente Dutra), FF-IR, etc.

### 5.3. COLETA DE ÁGUA E MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS

Entre julho e agosto de 2011 foram feitas duas campanhas de amostragem (Figura 4. a Figura 9), durante as quais foram coletadas 58 amostras de águas de poços e fontes nos aquíferos Serra Geral, Guarani e Pré-SAG (Tabela 1). Para uma coleta adequada, as bombas dos poços foram ligadas por pelo menos 30 minutos para a expurga. O conjunto de amostras em cada ponto consistiu em um litro de amostra não filtrada e não acidificada para análise de ânions; 500 mL de água não filtrada e acidificada para análise de metais e cátions; 100 mL de água filtrada e acidificada para análise de elementos traços; três frascos de 100 mL de água não filtrada para análise isotópica.



Figura 3. Poço termal do SASG amostrado para pesquisa, onde manteve-se sua identificação original vinculada ao cadastro nacional do SIAGAS da CPRM. Nota-se a sigla JQ-504 pintada na base do abrigo do quadro de comando.

As amostras destinadas às análises de cátions e metais dissolvidos foram filtradas em campo, com auxílio de uma bomba de vácuo manual, com filtro de membrana de acetato de celulose  $0,45 \mu\text{m}$  e preservadas com 10 mL ácido nítrico puro. Na ocasião da coleta também foram medidos *in situ* o pH, a condutividade elétrica e a temperatura do ar e da água. As medidas de temperatura do ar e da água foram registradas com termômetros de mercúrio e digitais. O pH foi obtido com medidores de campo Lutron-206 e Orion 1230. A condutividade elétrica foi medida com condutivímetros portáteis modelos Orion 1230 e Hanna 9033, com valores corrigidos para  $25^\circ \text{C}$ . As amostras foram armazenadas em caixas térmicas com gelo e posteriormente enviadas ao laboratório.

Tabela 1. Pontos amostrados para análise físico-química e isotópica.

Tipo de ponto amostrado	quantidade
Poços tubulares SASG	19
Poços tubulares SASG termal	20
Poços Sistema Aquífero Guarani	18
Poços Pré-SAG (unidade Rio do Rasto)	01

Os elementos maiores foram analisados no laboratório Químioambiental em Porto Alegre em um total de 24 parâmetros, cada qual segundo metodologias consagradas no meio analítico (Tabela 2)

Os elementos traços Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, In, La, Li, Lu, Mo, Nb, Nd, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, Rh, Ru, S, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, T, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn e Zr foram analisados no laboratório AcmeLabs em Vancouver- Canadá, através do método de ICP-MS, conforme os limites de detecção expostos na Tabela 3.

Para a análise de isótopos estáveis  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  e  $^{13}\text{C}$  as amostras foram coletadas no mesmo período em frascos de vidro com tampa hermética, um para cada isótopo, sendo que no destinado à análise do isótopo de  $^{13}\text{C}$  foi adicionado cloreto de mercúrio. As amostras foram preservadas e posteriormente analisadas no Laboratório de Geocronologia do IG da Universidade de Brasília - UnB em setembro de 2011. Os isótopos foram medidos no equipamento Delta V plus (IsotopeRatio MS) com acoplamentos de H-Device e Gas Bench II.

Tabela 2. Parâmetros analisados e respectivos métodos analíticos

Parâmetro	Metodologia analítica
Alumínio	Eriochrome Cyanine R/Espectro UV-VIS
Alcalinidade Total	Titulação potenciométrica
Bicarbonatos	Volume Neutralização/Titulométrico
Carbonatos	Volume Neutralização/Titulométrico
Cálcio	Complexométrico
Cloretos	Argentimétrico/Titulométrico
Dureza Total	Complexométrico
Ferro Total	Espectrometria de absorção atômica
Fluoretos	Eletrodo Íon Seletivo
Fosfatos	Ácido Ascórbico/Espectro UV-VIS
Magnésio	Complexométrico/Titulométrico
Manganês	Persulfato de Amônio/Espectro UV-VIS
Nitratos	Potenciométrico
Potássio	Fotométrico com chama
Sílica	Espectrofotometria UV
Sódio	Fotométrico com chama
Sólidos Totais Dissolvidos	Gravimetria
Sulfatos	Turbidimetria
pH	Eletrométrico
Condutividade Elétrica a 25° C	Condutivímetro



Figura 4. Equipamentos utilizados para a coleta e análise *in situ*.



Figura 5. Expurga para coleta de água do poço JQ-499 em Vicente Dutra,RS.



Figura 6. Medição de temperatura da água (57° C) no poço JP-714 que capta o SAG na Linha São Luís São Lourenço do Oeste, SC.



Figura 7. Bomba de vácuo manual e conjunto com filtro de membrana de acetato de celulose 0,45  $\mu\text{m}$  para águas destinadas a análises de cátions e metais dissolvidos



Figura 8. Amostragem em poço jorrante IN-710 em União do Oeste, SC.



Figura 9. Bombeamento visando à coleta de água no poço IH-941 da Termas Machadinho, RS.

Tabela 3. Limites de detecção adotados pelo laboratório da AcmeLabs.

<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Au</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Be</b>	<b>Bi</b>	<b>Br</b>	<b>Ca</b>
ppb	ppm								
0,05	1	0,5	0,05	5	0,05	0,05	0,05	5	0,05
<b>Cd</b>	<b>Ce</b>	<b>Cl</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cs</b>	<b>Cu</b>	<b>Dy</b>	<b>Er</b>	<b>Eu</b>
ppb	ppb	ppm	ppb						
0,05	0,01	1	0,02	0,5	0,01	0,1	0,01	0,01	0,01
<b>Fe</b>	<b>Ga</b>	<b>Gd</b>	<b>Ge</b>	<b>Hf</b>	<b>Hg</b>	<b>Ho</b>	<b>In</b>	<b>K</b>	<b>La</b>
ppb	ppm	ppb							
10	0,05	0,01	0,05	0,02	0,1	0,01	0,01	0,05	0,01
<b>Li</b>	<b>Lu</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Nb</b>	<b>Nd</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>
ppb	ppb	ppm	ppb						
0,1	0,01	0,05	0,05	0,1	50	0,01	0,01	0,2	10
<b>Pb</b>	<b>Pd</b>	<b>Pr</b>	<b>Pt</b>	<b>Rb</b>	<b>Re</b>	<b>Rh</b>	<b>Ru</b>	<b>S</b>	<b>Sb</b>
ppb	ppm	ppb							
0,1	0,2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	1	0,05
<b>Sc</b>	<b>Se</b>	<b>Si</b>	<b>Sm</b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>Ta</b>	<b>Tb</b>	<b>Te</b>	<b>Th</b>
ppb									
1	0,5	40	0,02	0,05	0,01	0,02	0,01	0,05	0,05
<b>Ti</b>	<b>Tl</b>	<b>Tm</b>	<b>U</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Y</b>	<b>Yb</b>	<b>Zn</b>	<b>Zr</b>
ppb									
10	0,01	0,01	0,02	0,2	0,02	0,01	0,01	0,5	0,02

#### 5.4. ANÁLISE DE LINEAMENTOS

Os lineamentos morfo-estruturais foram traçados a partir da fusão entre imagem LandSat e relevo sombreado em modelo digital do terreno no software *ArcGis* 10.3.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da área investigada foi construído a partir dos dados da Missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission, Farret *et al.*, 2007), disponíveis gratuitamente em: <http://seamless.usgs.gov>, com resolução espacial de 90 metros. Posteriormente foram geradas imagens de relevos sombreados com elevação solar de 45° para os seguintes azimutes: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°. A extração das feições

lineares de relevo foi feita manualmente a partir da interpretação visual de imagens do relevo sombreado, com aplicação de iluminação artificial do SRTM, e de imagens LANDSAT, compatíveis com a escala 1:500.000 (Figura 10). Este traçado de lineamentos sobre a imagem derivada da fusão utilizou o princípio da não inferência proposto por Schuck *et al.* (1986) em um ambiente SIG na plataforma *ArcGis* versão 10.3.

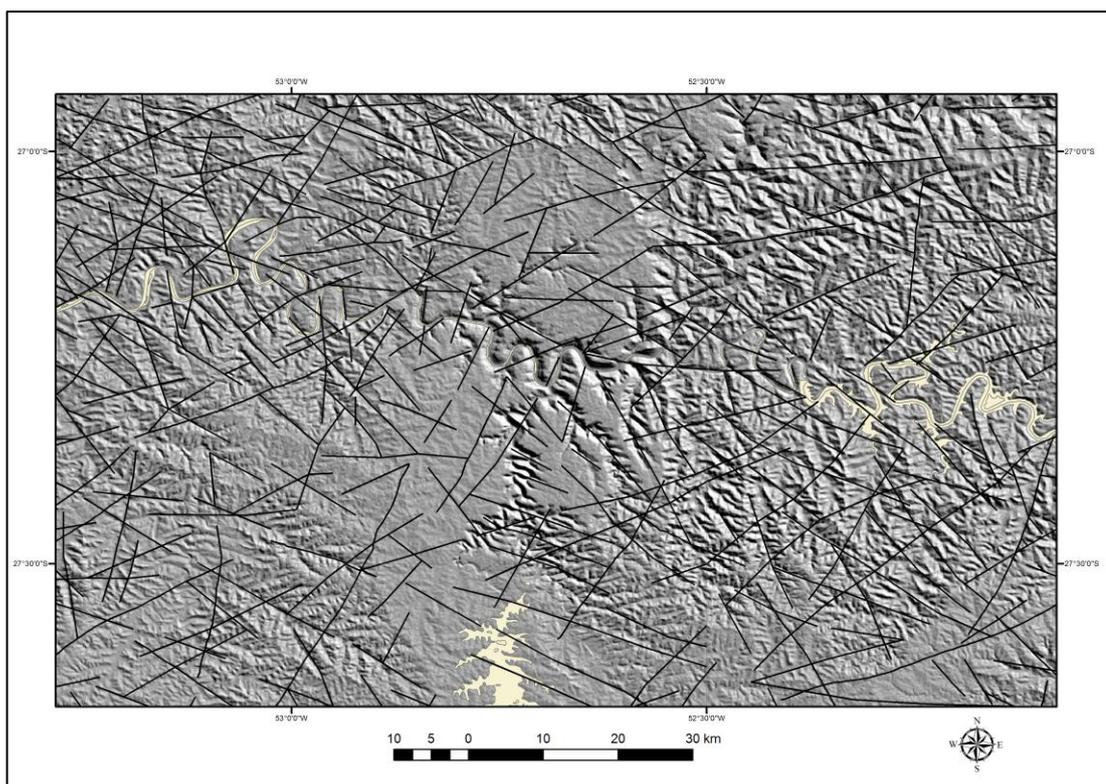


Figura 10. Traçado de lineamentos morfoestruturais em imagem de relevo sombreado na escala 1:500.000, segundo o método da não inferência (Schuck *et al.*, 1986).

## 5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória dos parâmetros hidrogeoquímicos por meio de conceitos básicos da estatística descritiva. Para o entendimento do comportamento regional do SASG em termos de salinidade, aplicou-se a Análise Exploratória de Dados em valores de condutividade elétrica medidas em campo, a fim de se definir os valores de *background* e anomalias das águas desse sistema aquífero.

Nos parâmetros determinados nas 58 análises realizadas na área de estudo adotou-se as técnicas de estatística multivariada como Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise de Agrupamento (*Cluster Analysis*).

### 5.5.1. Análise Exploratória de Dados

O tratamento estatístico dos parâmetros hidrogeoquímicos foi realizado através de conceitos básicos da estatística descritiva e apresentação gráfica de distribuições amostrais. Para a determinação dos valores anômalos de condutividade elétrica das águas do SASG foi adotada a técnica da Análise Exploratória de Dados (AED). Tal método foi introduzido por Tukey (1977) para analisar dados que não seguem obrigatoriamente uma distribuição normal e apresenta a vantagem de não fazer muitas exigências sobre a distribuição estatística dos dados, como ocorre com outros métodos. A AED dá ênfase à exploração original com o objetivo de simplificar a descrição dos dados e obter uma visão da sua natureza. O método avalia os dados em nível preliminar sem a necessidade de hipóteses sobre a distribuição destes, empregando cálculos e gráficos relativamente simples. Os diagramas não são sensíveis a valores extremos, como outras medidas baseadas na média e desvio padrão.

Para Andriotti (2013), a AED não é somente um método, mas sim uma filosofia ou uma abordagem robusta que consiste de um conjunto de estatísticas descritivas e principalmente de ferramentas gráficas, que visam obter o máximo de informações sobre os dados. Também auxilia na definição da sua estrutura, variáveis significativas e na determinação dos *outliers* (valores aberrantes) e anomalias.

Pelo método da *Boxplot* (Figura 11) se define o IQR - *Inter Quartile Range* (Desvio Inter-Quartis) como a diferença entre o terceiro e o primeiro quartis. Os quartis superior e inferior definem a caixa central, que contém aproximadamente 50% dos dados. Um dos valores limites é definido como uma caixa estendida por 1,5 vezes o comprimento da mesma em direção ao máximo a partir do 3º quartil, e ao mínimo a partir do 1º quartil. Os valores que estão nos extremos destes limites são os *whiskers*. Valores situados fora do intervalo dos *whiskers* são definidos como *outliers*. Valores além de três vezes (para mais ou para menos) a largura da faixa, acima da superior ou abaixo da inferior, são definidos como *outliers* extremos, ou seja, valores não usuais para o conjunto de dados. Dois valores limítrofes valem respectivamente  $(1,5 \times \text{IQR})$  e  $(3,0 \times \text{IQR})$  em direção ao valor mínimo, da mesma forma outros dois valores são definidos como  $(1,5 \times \text{IQR})$  e  $(3,0 \times \text{IQR})$ , respectivamente, na direção do valor máximo. É importante ressaltar que a vantagem desta representação é a simplificação em termos de quantidades de classes. O objetivo é separar poucas categorias que apresentem individualmente significado geoquímico específico.

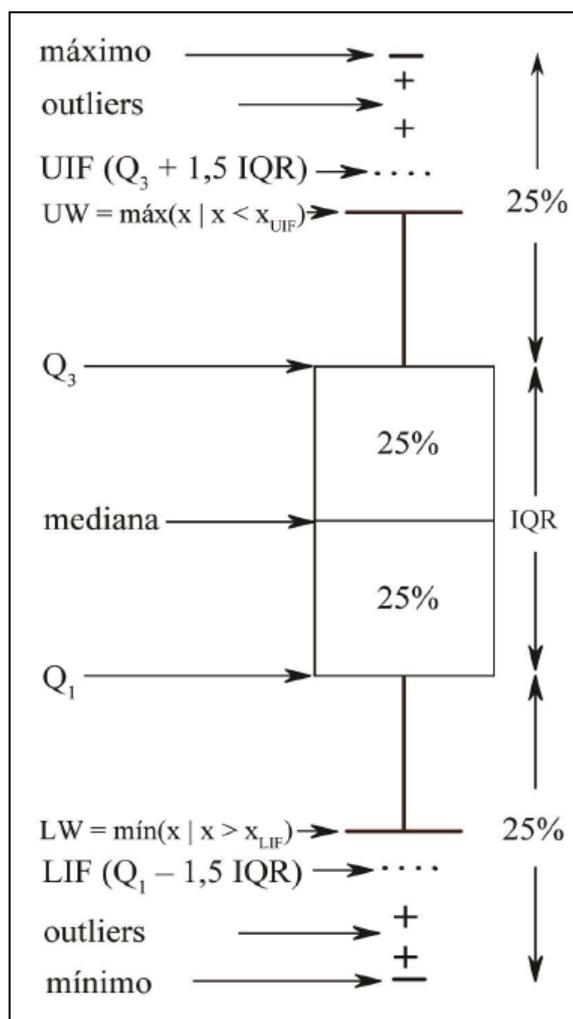


Figura 11. *Boxplot* com os parâmetros utilizados na análise exploratória de dados (adaptado de Andriotti, 2013).

## 5.5.2. Análise Multivariada dos Parâmetros Físico-químicos e Isotópicos

### 5.5.2.1. Técnicas de Análise Multivariada

Este item se refere ao desenvolvimento teórico resumido das técnicas de análise multivariada usadas neste estudo, como a análise em componentes principais (ACP) e a análise de clusters (AC).

Com estas técnicas pretendeu-se resumir a informação contida nos dados, de forma a tornar mais fácil a sua interpretação.

A ACP relaciona-se diretamente com as variáveis e designa-se por análise modo-R, ao passo que a última técnica (AC) relaciona-se com os indivíduos e designa-se por análise modo-Q.

Mais claramente, a análise-modo R permite identificar as variáveis que mais contribuem para a explicação da variabilidade dos dados, com a menor perda de informação. A análise modo-Q é usada para agrupamento de indivíduos em classes/grupos homogêneos, através de características comuns entre os indivíduos.

As técnicas multivariadas adotadas neste estudo foram implementadas através do pacote computacional *Statistica* versão 12.

### **5.5.2.2. Análise de Componentes Principais**

A análise de componentes principais é um método de análise multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais correlacionadas num conjunto de novas variáveis não correlacionadas: as componentes principais. As variáveis originais e as componentes principais têm a mesma dimensão.

O principal objetivo da ACP é a redução da dimensionalidade, ou seja, a diminuição do número de componentes, de forma a explicar a variabilidade dos dados. Esta redução consegue-se uma vez que as variáveis originais estão correlacionadas, sendo algumas delas redundantes, ao passo que as componentes principais são não correlacionadas, podendo explicar a informação dada pelas variáveis originais com um menor número de componentes. Caso as variáveis originais estejam fracamente correlacionadas, as componentes principais vão coincidir com as variáveis originais.

Estas novas variáveis, as componentes principais, são uma combinação linear das variáveis originais, com uma ordem decrescente de importância. A primeira componente principal é a mais importante, uma vez que descreve a maior parte da variabilidade dos dados.

Pretende-se que este número de componentes principais seja o menor possível, ou seja, parte-se de  $p$  variáveis originais para  $k$  componentes principais, com  $k$  muito inferior a  $p$ , de modo que a perda de informação seja a menor possível.

Assim sendo, se as variáveis originais estiverem muito correlacionadas, o número de componentes principais que expliquem a variabilidade é reduzido. Caso as variáveis originais estejam pouco correlacionadas essa redução é pouco significativa.

### **5.5.2.3. Análise de Agrupamento**

A análise de agrupamento ou *clusters* é uma técnica de análise multivariada que tem como principal objetivo o agrupamento de elementos. Este agrupamento é efetuado de forma

que elementos pertencentes ao mesmo grupo tenham características semelhantes e elementos de diferentes grupos possuem características distintas. Genericamente, parte-se de um conjunto com “n” observações e pretende-se formar “k” grupos com um menor número de observações.

Para a construção desses grupos usam-se métodos hierárquicos ou métodos não hierárquicos. Entre os métodos hierárquicos, estes podem ser aglomerativos ou divisivos.

## 5.6. TRATAMENTO DE DADOS HIDROGEOQUÍMICOS

Os resultados, originalmente apresentados em mg/L, foram convertidos para meq/L e passaram pelo cálculo da diferença de balanço iônico (DBI) conforme a equação abaixo:

$$DBI(\%) = 100 \times [(\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions} / (\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions}))] \quad (1)$$

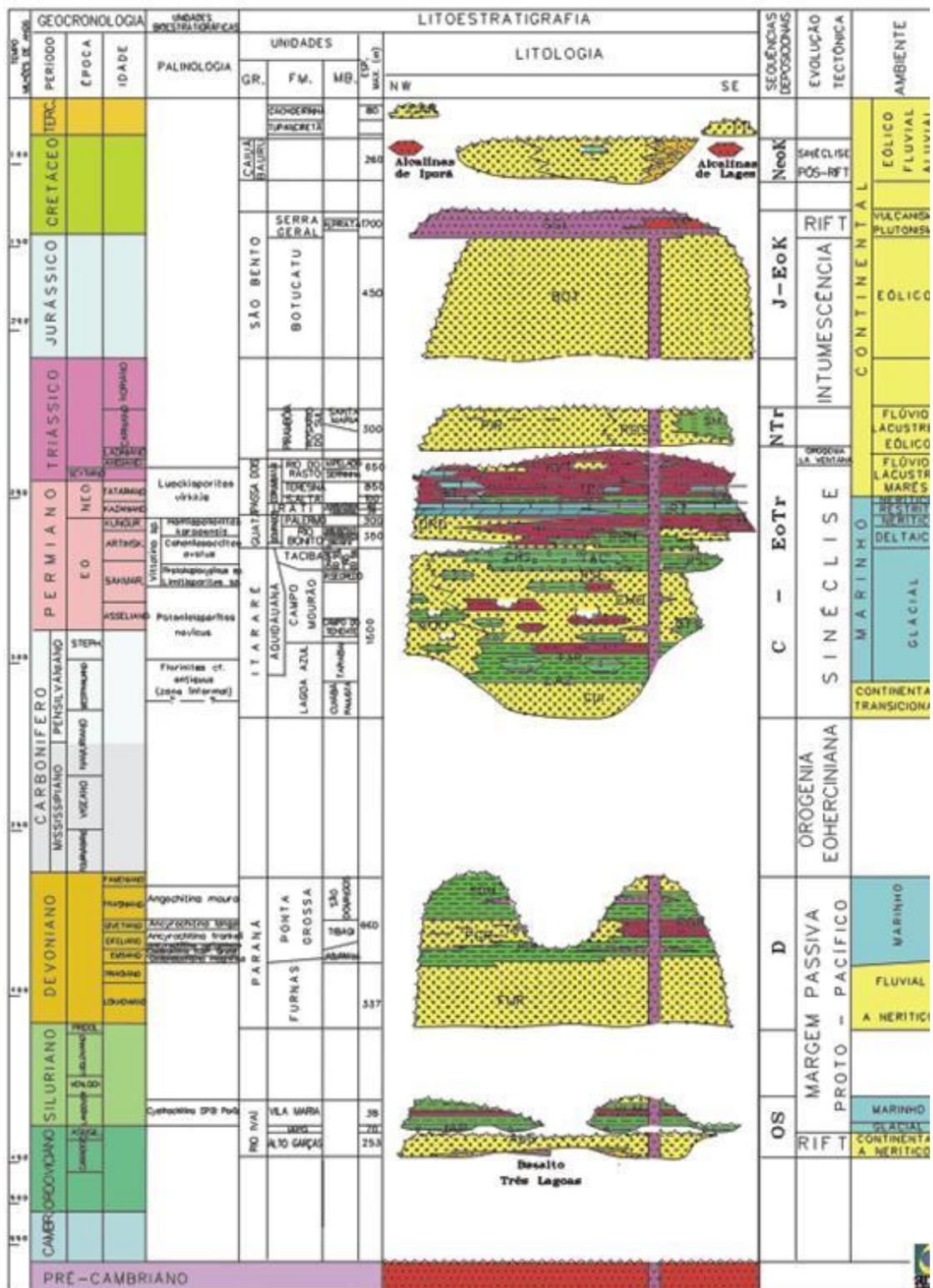
Adotou-se aceitar os resultados com DBI variando 10% para mais ou para menos, conforme critério sugerido por Feitosa *et al.* (2008).

A avaliação hidroquímica foi realizada através da utilização do pacote computacional *AquaChem* versão 2011 1.61, com os tipos geoquímicos das águas determinados através dos gráfico de Piper (1944), plotando-se os percentuais de mili-equivalentes dos principais cátions e ânions.

Para o modelamento hidrogeoquímico utilizou-se o pacote computacional EQ3/6 que permite modelar as interações químicas e mineralógicas em sistemas aquosos. Os principais componentes do pacote são EQ3NR (código de especiação solubilidade), EQ6 (código de caminho de reação), EQLIB (biblioteca de suporte) e uma base de dados de suporte termodinâmico. O EQ3NR calcula através dos dados analíticos a especiação e o índice de saturação em soluções aquosas.

## 6. CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRUTURAL REGIONAL

A Bacia do Paraná, bacia intracratônica originada a partir do Ordoviciano, apresenta um pacote sedimentar com mais de 3.500 m de espessura (Zalán *et al.*, 1986), subdivididos em cinco supersequências por Milani (1997). A sedimentação ocorreu em ambientes tanto continentais como marinhos. A coluna estratigráfica da Bacia do Paraná, de acordo com Milani (1997), está representada na Figura 12.



E.JMILANI et al., 1993

Figura 12. Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná (Milani, 1997).

Na área de estudo, a Bacia atinge espessuras de até 4.000 metros, conforme registro no poço para pesquisa de hidrocarbonetos da Paulipetro 1-SE-1-SC em Seara/SC. Tal diversidade

de rochas sedimentares, aliada aos eventos tectônicos, imprimiu a esta bacia a condição de uma das maiores reservas de água subterrânea do mundo distribuída em uma área de mais de 1,2 milhões de km<sup>2</sup> nos territórios do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai.

A estruturação tectônica da Bacia do Paraná vem sendo objeto de muitos estudos voltados principalmente à prospecção de hidrocarbonetos, que utilizam técnicas de sensoriamento remoto, levantamentos geofísicos e de geologia estrutural (ASMUS, 1975; SOARES *et al.*, 1982; ZALÁN *et al.*, 1986; SOARES *et al.*, 2008).

Zalán *et al.* (1991), em uma abordagem sobre a evolução geológica da bacia, descrevem regionalmente seu arranjo estrutural, que apresenta um marcante padrão de feições lineares que se cruzam (Figura 13). Tais feições são divididas em três grupos de acordo com suas orientações (NW-SE, NE-SW e E-W). As direções NW-SE e NE-SW são as orientações mais importantes e podem representar falhas simples ou zonas de falhas extensas, com centenas de quilômetros de comprimento e algumas poucas dezenas de quilômetros de largura. Segundo os autores são antigas zonas de fraqueza que foram reativadas durante o processo de evolução da bacia.

Soares *et al.* (1982) também reconhecem este mesmo padrão de direções NW e NE, através de estudo detalhado de imagens LANDSAT e de radar nas porções central e oriental da bacia. Tais autores identificaram faixas retilíneas com alta concentração de lineamentos separados em três grupos direcionais NW (variando de N25° a N65°W) e dois grupos de NE (variando entre N35°E e N60°E). Estas zonas estruturais representam áreas de maior mobilidade tectônica em comparação com as áreas adjacentes. Também concluíram que esses elementos representam zonas de fraqueza do embasamento, onde as direções NW estão intensivamente intrudidas por diques básicos, enquanto que as direções NE não apresentam estas feições. O padrão estrutural das zonas de falha NE é diferente, pois elas são constituídas ou por uma única falha larga ou por uma zona de falha retilínea (exceção das zonas de falha Lancinha-Cubatão e Transbrasiliiano), geralmente sem a presença de diques (ZALÁN *et al.*, 1990). No entanto, as estruturas relacionadas a movimentações transcorrentes são muito mais comuns ao longo dos lineamentos de direção NE. Os movimentos ao longo das estruturas tiveram componentes horizontais e verticais, com os blocos por elas delineados movimentando-se para cima e para baixo, em um estilo estrutural típico de falhas verticais. Os rejeitos verticais são em geral pequenos, atingindo, no máximo, poucas centenas de metros.

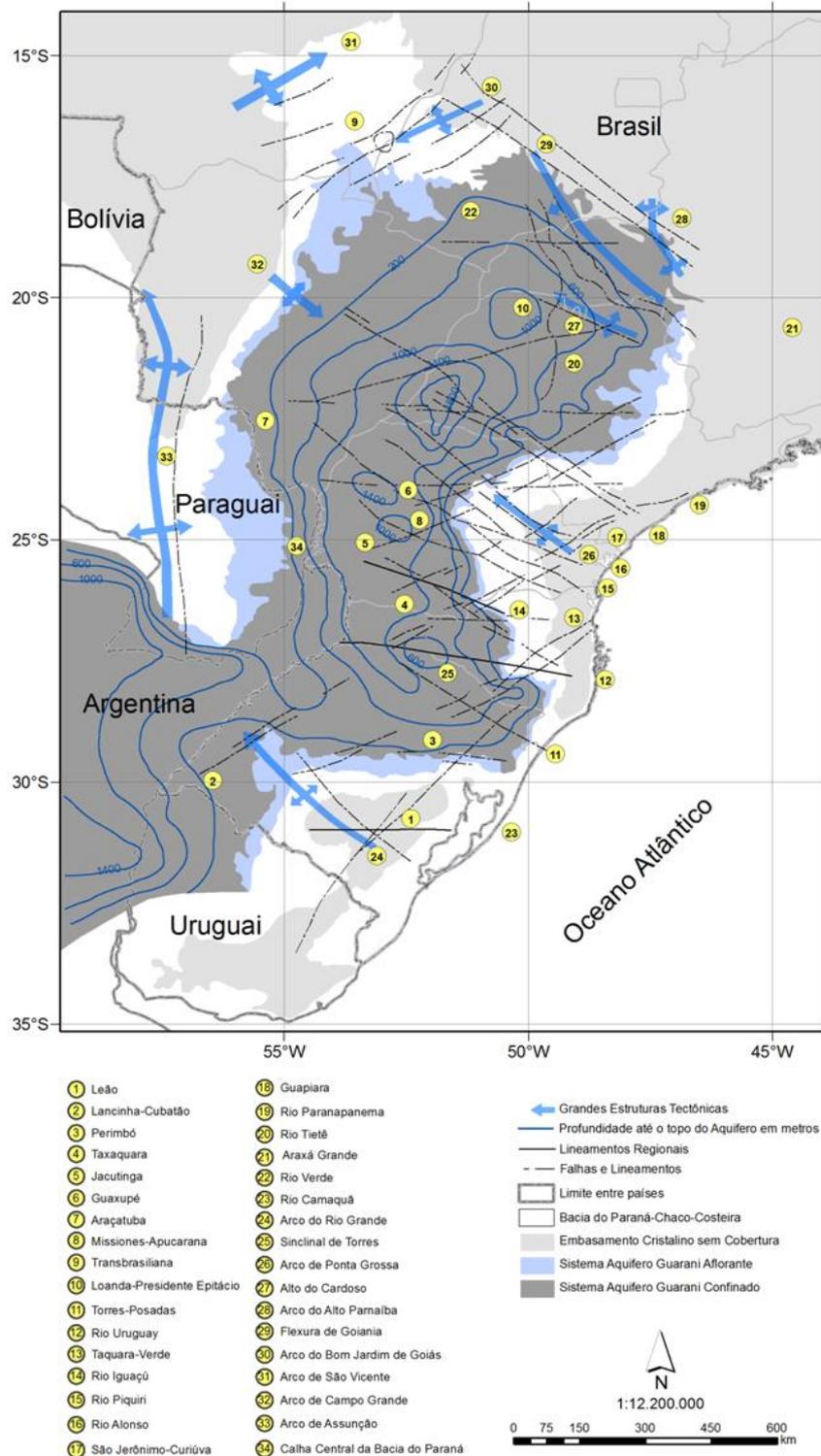


Figura 13. Principais estruturas regionais da Bacia do Paraná (ZALÁNet al., 1990; ASMUS, 1975) e distribuição espacial do SAG (modificado de Machado, 2005).

Freitas *et al.* (2002), em estudo sobre lineamentos estruturais realizado na escala 1:250.000 na região oeste de Santa Catarina, destacam as direções N30°-50°E e N40°-60°W como principais e as N-S e E-W como secundárias. Também mencionam falhas verticais de direção N70°E com 135 km de extensão e prováveis falhas N-S com fontes hipotermiais associadas na bacia hidrográfica do Rio das Antas.

Soares *et al.* (2008) comparam os lineamentos da Bacia do Paraná interpretados e traçados a partir de diversas fontes (sensoriamento remoto e geofísica) e concluem que há um alto índice de concordância para as direções NW e NE, enquanto que nas direções NNE, NNW, E-W e N-S os índices são baixos. Estes autores também descrevem uma forte compartimentação estrutural na bacia com blocos limitados por falhas com rejeitos na ordem de 100 metros.

Machado *et al.* (2012) mostram o resultado de um estudo multiescala de lineamentos estruturais na borda leste da Bacia do Paraná em Santa Catarina, associados a estudos estruturais em pedreiras de rochas alcalinas na região do Domo de Lages. Segundo os autores há correlação entre fotolineamentos extraídos e falhas analisadas nas pedreiras, com destaque para as direções N-S (NNE a NNW) e E-W (ENE a ESE), que correspondem a falhas transcorrentes dextral e sinistral, respectivamente. Em segundo plano ocorrem as direções NE e NW. Tais estruturas são reativações do embasamento associadas a um campo de tensão  $\sigma_1$  orientado NE-SW com idade entre o Eocretáceo e o Terciário.

Philipp *et al.* (2014) apresentam os resultados de modelagem de dados magnetotelúricos e análise integrada com informações geológicas, estruturais e geofísicas na caracterização de estruturas de *rifteamento*, estratigrafia e intrusões na porção sul-sudeste da Bacia do Paraná. Estes autores propõem vários falhamentos de direções NW-SE e NE-SW, corroborados por dados de geofísica em três seções regionais de dados magnetotelúricos.

## **7. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL**

Neste capítulo são apresentadas somente as unidades importantes sob o ponto de vista de ocorrência de águas subterrâneas, bem como de influência na hidrogeoquímica na área em estudo.

As formações geológicas são agrupadas em unidades hidroestratigráficas (UHE), que significam, segundo Machado (2005), um conjunto de camadas de sedimentos ou rochas de qualquer natureza, caracterizada por sua porosidade e permeabilidade, com condições de fluxo de água subterrânea, que podem ser distintas tanto em condições naturais ou de

bombeamento. Desta forma as unidades hidroestratigráficas compõem os principais sistemas aquíferos regionais: Sistema Aquífero Serra Geral (SASG); Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Pré SAG.

### 7.1. SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL

A Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral desenvolve-se sobre as rochas vulcânicas cretáceas de composição básica a ácida do Grupo Serra Geral (WILDNER *et al.*, 2009) que estão correlacionadas com o pacote vulcânico de Etendeka (Namíbia), configurando uma das maiores exposições de províncias ígneas continentais do planeta. As rochas associadas ao Grupo Serra Geral afloram praticamente em toda a área da Bacia do Paraná, cerca de 900.000 km<sup>2</sup>, abrangendo todo o sul do Brasil, parte do Paraguai, Argentina e Uruguai (Figura 14).

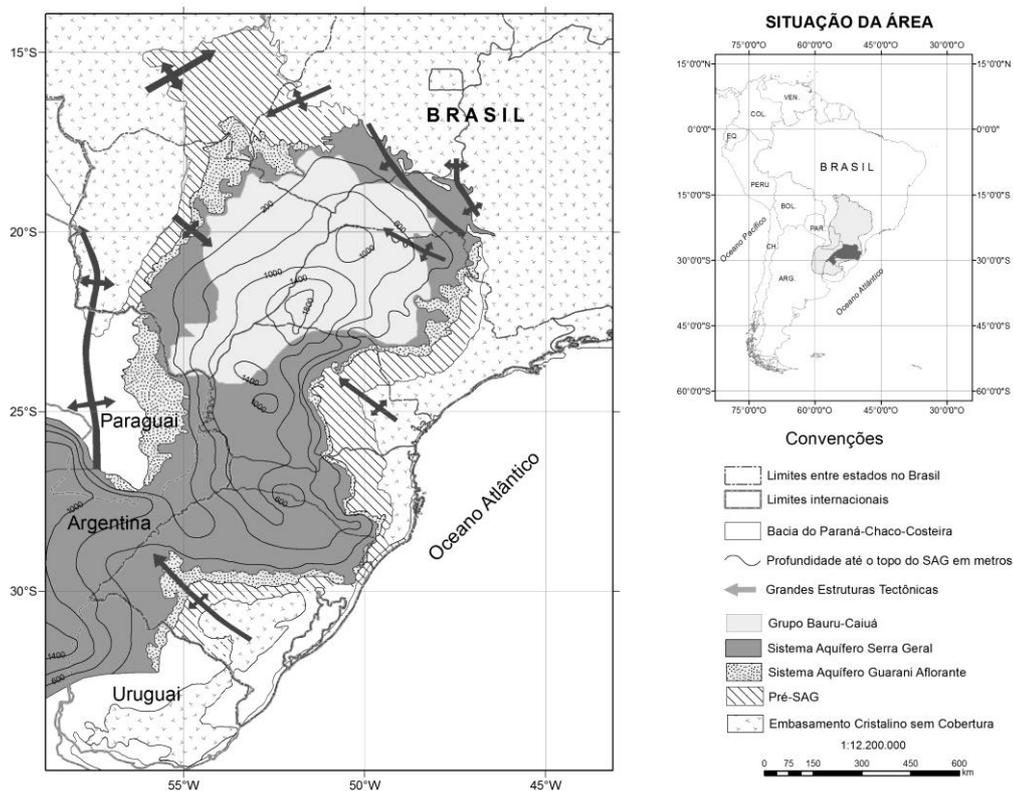


Figura 14. Área de ocorrência do SASG e principais sistemas aquíferos na Bacia do Paraná.

Esta unidade, em suas mais diversas faciologias (basaltos, riolitos e arenitos interderrames), caracteriza-se pela capacidade de armazenamento e de circulação da água relacionadas à presença de juntas e fraturas, ampliada por suas zonas vesiculares e amigdaloidais, de topo de derrame e zonas de disjunção horizontal, formando o Sistema Aquífero Serra Geral.

O SASG confina os aquíferos de natureza sedimentar como o SAG (ARAÚJO *et al.*, 1995) e Sistema Aquíferos mais profundos de idade permiana (Pré-SAG). O mecanismo de recarga do SASG e sua interação com o SAG e os aquíferos permianos, dependem da presença de estruturas tectônicas e das cargas hidráulicas envolvidas. A Figura 15 ilustra o modelo conceitual do mecanismo de recarga meteórica e recarga ascendente, além da mistura de águas entre os sistemas aquíferos.

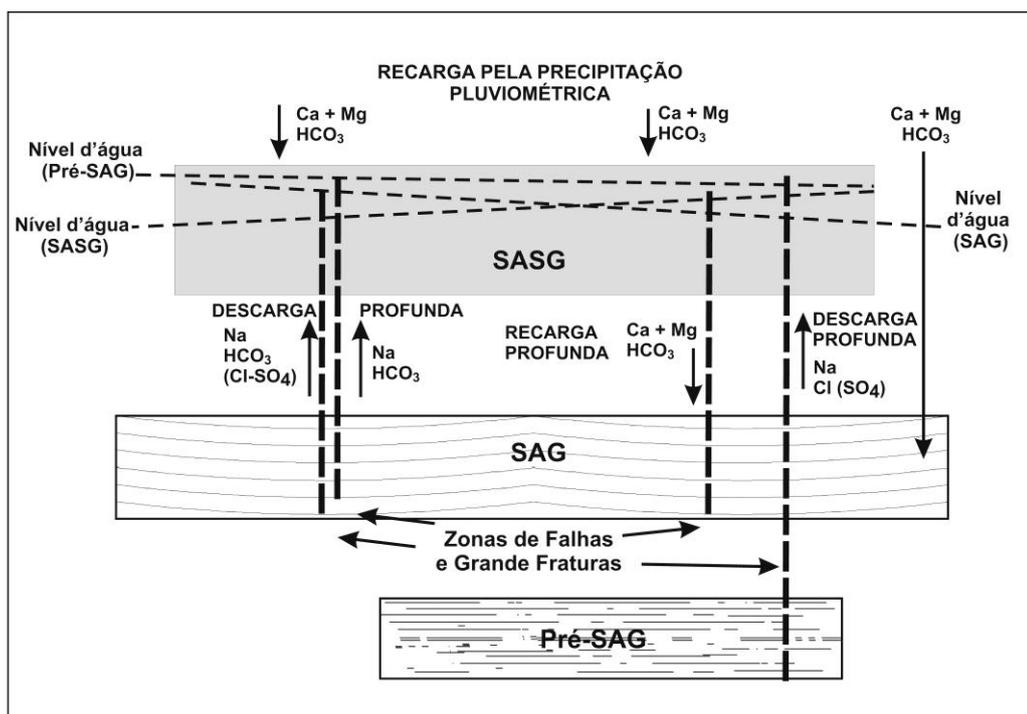


Figura 15. Esquema de modelo conceitual dos mecanismos de recarga do SASG, sua relação com os aquíferos SAG e Pré-SAG, bem como os tipos hidrogeológicos resultantes (Modificado de Machado e Freitas, 2000).

Pelas suas características hidrogeológicas e grande área de ocorrência, o SASG representa o principal recurso hídrico subterrâneo na região sul do Brasil, possibilitando a captação de água subterrânea a um custo reduzido, em geral, suprindo satisfatoriamente as comunidades rurais, indústrias e até sedes de pequenos municípios. Suas águas são exploradas por meio de poços tubulares e captações de fontes e utilizadas para diversas finalidades. Na área de estudo, que engloba a ocorrência do SASG nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os poços tubulares que captam o aquífero fraturado apresentam profundidade máxima de 468 metros e valores médios de 110,4 metros. As vazões são muito variáveis e atingem até  $78,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , com média de  $11,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

As rochas fraturadas do Grupo Serra Geral configuram-se como aquíferos livres, podendo, em casos particulares, desenvolver condições de aquífero confinado (HAUSMAN, 1995). A condutividade hidráulica do SASG é muito variável e de complexa avaliação e previsão, devido ao meio ser normalmente heterogêneo e anisotrópico.

Freitas *et al.* (2002) citam vários casos de poços jorrantes, alguns deles com vazões livres consideráveis e localmente com termalismo associado. Os mesmos autores descrevem as estruturas dos derrames no oeste de Santa Catarina, que pode ser estendido para toda a região Sul do país, e as relacionam com o armazenamento e circulação da água subterrânea no Sistema Aquífero Serra Geral.

A zona vítrea, correspondente à porção basal de cada derrame, geralmente manifesta-se através de um nível argiloso com alguns metros de espessura, devido à desvitrificação e alteração do material. Sobre essa zona vítrea, sucede-se a zona de disjunção horizontal, caracterizada pelo diaclasamento em planos horizontais bem marcados, espaçados de alguns centímetros, imprimindo à água subterrânea uma pequena circulação horizontal. Tal fato ocorre com maior frequência nas unidades de caráter ácido como o Tipo Chapecó e do Tipo Palmas/Caxias (BELLIENI *et al.*, 1985 apud FREITAS *et al.*, 2003). A percolação de água pela zona vertical, geralmente espessa e inalterada recarrega as diáclases horizontais. No topo dos derrames situa-se a zona de desgaseificação, na qual os gases e fluidos originários do magma ficam aprisionados próximos à superfície. É muito comum ocorrer nessa zona a mistura de fluidos, fragmentos de rocha resfriada, paleo-solos e sedimentos arenosos dando origem a um complexo escoriáceo avermelhado contendo vesículas e amígdalas denominado de autobrecha. Esses vazios apresentam diâmetros que variam de milímetros a dezenas de centímetros, e quando se encontram alterados e interligados por sistemas de fraturamento, apresentam excelentes condições de armazenamento de água subterrânea.

Na base rochas porfíricas do Tipo Chapecó e na base dos Basaltos Cordilheira Alta e Campo-Erê (FREITAS *et al.*, 2002; FREITAS *et al.*, 2003), ocorrem sedimentos vulcanogênicos representados por litoarenitos e arenitos finos a médios com fragmentos de rochas basálticas avermelhados (Figura 16). Esses níveis arenosos muitas vezes foram lixiviados dando origem a vazios incrementando a permeabilidade do meio rochoso.



Figura 16. Arenitos interderrames vulcanogênicos, muito friáveis, situados em altitude de 725 metros, em Cordilheira Alta, SC, com blocos arredondados de rocha vulcânica.

Freitas *et al.* (2002), baseados em levantamento estatístico sobre profundidades de entradas d'água em cerca de 2800 poços tubulares, construídos no Sistema Aquífero Serra Geral do oeste catarinense revelam o seguinte panorama: 17,20% das entradas d'água ocorrem até 20 m de profundidade; 70,27% de 20 até 100 m de profundidade; 11,06% de 100 até 150 m de profundidade e somente 1,47% das contribuições ocorre em profundidades superiores a 150 m. O estudo comprova que as principais contribuições nos poços dessa unidade ocorrem até a profundidade de 100 metros.

Reginato (2003), propondo metodologias de prospecção no Sistema Aquífero Serra Geral, realizou um estudo de detalhamento estrutural com base em levantamentos de campo e interpretação de produtos de sensoriamento remoto. As principais estruturas encontradas apresentam orientação nordeste e noroeste. Os poços com vazões de 10 a 20 m<sup>3</sup>/h estão geralmente correlacionados com lineamentos de direção nordeste, enquanto que nos de direção noroeste os poços apresentam vazões superiores a 20 m<sup>3</sup>/h.

Freitas *et al.* (2012) separam o SASG no noroeste do Rio Grande do Sul em quatro domínios hidrogeológicos, onde a melhor zona atinge vazões de até 80 m<sup>3</sup>/h. Os tipos hidrogeoquímicos principais identificados contemplam águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e águas bicarbonatadas sódicas. As primeiras estão relacionadas à recarga

meteórica através do solo ou manto de alteração e o segundo tipo refere-se à mistura com as águas do SAG.

## 7.2. SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) ocupa uma área de aproximadamente 1,2 milhões de km<sup>2</sup> (Figura 14) abrangendo territórios do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. No Brasil estende-se por oito estados: Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, São Paulo, Paraná, Goiás, Minas Gerais, Santa Catarina e Mato Grosso (ARAÚJO *et al*, 1995). Segundo Machado (2005), recentes estudos incluíram, além das Formações Botucatu e Piramboia, os estratos pertencentes ao Grupo Rosário do Sul, quando passou a ter a denominação de SAG, visando também uniformizar a sua hidroestratigrafia com a dos demais países do Cone Sul.

Na área em estudo, o Sistema Aquífero Guarani está representado pelas unidades hidroestratigráficas Botucatu e Piramboia.

### 7.2.1. Unidade Hidroestratigráfica Botucatu

A Unidade Hidroestratigráfica Botucatu(UHB) é a mais importante unidade da Bacia do Paraná componente do SAG e conseqüentemente a mais estudada e conhecida. Esta unidade, de ambiente deposicional predominantemente eólico, é constituída por arenitos finos a médios, quartzosos e localmente feldspáticos, bem selecionados com cores em tons avermelhados, subordinadamente amarelados e mais raramente esbranquiçados. Segundo Machado (2005), as estruturas primárias mais representativas da unidade hidroestratigráfica Botucatu são a laminação plano-paralela e as estratificações cruzadas do tipo tabular e acanalada, de pequeno a muito grande porte. No topo da unidade, de modo geral, os arenitos eólicos intercalam-se concordantemente com as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, dando origem a corpos lenticulares de arenitos interderrames, com espessuras métricas a decamétricas e distribuição irregular.

Por ser uma unidade de extensão regional, com cerca de 1.200.000 km<sup>2</sup>, está sujeita a heterogeneidades litofaciológicas, diagenéticas, epigenéticas, além da estruturação por falhas, flexuras e intrusões, que tornam seu comportamento hidrogeológico complexo e de difícil predição. Tais heterogeneidades imprimem ao aquífero compartimentações de natureza hidráulica e hidrogeoquímica, conforme verificado por Rosa Filho *et al*. (2003), Ferreira *et*

*al.* (2005), Machado (2005), Rosa Filho *et al.* (2005), Hindi (2007), Silva e Ferreira (2007), Soares *et al.* (2008), Scheibe e Hirata (2008) e Mocellin e Ferreira (2009).

No Rio Grande do Sul a UHB possui comportamento heterogêneo, quando se compara sua ocorrência desde a fronteira oeste até a região litorânea e apresenta espessuras médias variáveis entre 50 e 100 metros, até sua completa ausência em algumas regiões do estado (Machado, 2005). As melhores condições hidrogeológicas dessa unidade estão presentes nas regiões em que o aquífero está confinado, como na *cuesta* basáltica da fronteira uruguaio-argentina, onde há alta porosidade e grande homogeneidade granulométrica. Os poços lá construídos para irrigação apresentam capacidades específicas entre 5,0 e 10,5m<sup>3</sup>/h/m. A transmissividade (T) mostra valores médios que variam entre 169e 567 m<sup>2</sup>/dia, com condutividade hidráulica (K) oscilando entre 2,25 e 10,3 m/dia. Os valores de coeficiente de armazenamento (S), segundo Machado (2005), são de  $1,0 \times 10^{-3}$  a  $3,2 \times 10^{-6}$  para poços-teste perfurados na porção confinada do aquífero no município de Alegrete, RS.

Conforme Soares *et al.* (2008) a UHB, em Santa Catarina, ocorre numa faixa estreita e contínua com espessura média de 50 metros, constituída por arenitos quartzosos finos a médios, rosados, bem selecionados, com grãos foscas, bimodais, com pouca matriz, grãos soltos e raramente silicificados. Na região oeste deste estado a unidade encontra-se totalmente coberta pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, comportando-se em toda sua extensão como um aquífero confinado (FREITAS *et al.*, 2002). Já na porção leste do estado, as litologias eólicas são aflorantes e seu comportamento passa a ser de aquífero livre, com a recarga exclusivamente através da pluviometria. O gradiente hidráulico varia de 900 a 300 metros, com direção preferencial do fluxo subterrâneo de E-W e NE-SW (ROSA FILHO *et al.*, 1998). Próximo da divisa com o Rio Grande do Sul, o fluxo subdivide-se para sudeste em direção ao Oceano Atlântico e para noroeste em direção ao Rio Uruguai. Segundo estes autores, a queda de potencimétrica para 300 metros na calha do Rio Uruguai, indica uma provável área de descarga do aquífero.

A seção hidrogeológica realizada por Freitas *et al.* (2002) elaborada a partir de dados de poços profundos, também indica que ao longo do rio Uruguai, na porção entre Chapecó e São João do Oeste, ocorre uma provável área de descarga, sugerida pela existência das fontes termais de Palmitos, São Carlos e Águas de Chapecó. Entre Piratuba e Itá, a mesma seção revela que as camadas sedimentares estão alçadas e o nível potencimétrico cai em relação à primeira localidade. A UHB nesta porção apresenta águas com temperaturas e teores de sólidos totais dissolvidos menores que as do extremo oeste, sugerindo uma possível área de recarga através das zonas de fratura. Dados apresentados por Freitas *et al.* (2002) e por

Zanatta e Coitinho (2004), mostram que as vazões obtidas em poços nas áreas próximas à zona de afloramento variam de 12 a 52 m<sup>3</sup>/h, enquanto que nas áreas de alto confinamento as vazões variam de 100 a 190 m<sup>3</sup>/h.

No Paraná, de acordo com Soares *et al.* (2008), os arenitos eólicos da UHB são avermelhados, bimodais, com granulometria grossa e fina, grãos bem selecionados, foscos e arredondados. A espessura varia entre 60 e 100 metros e eventualmente podem atingir até 120 metros de espessura com estratificações de grande porte, que atingem *sets* de até 20 metros. Poços perfurados em Foz do Iguaçu, Iretama (Águas de Jurema), Itaipulândia e Marechal Cândido Rondon, atingiram espessuras inferiores a 100 metros na unidade Botucatu e as vazões giram em torno de 250 m<sup>3</sup>/h. Por outro lado, na região de Londrina e de Ibiporã, onde a espessura do aquífero é maior, os poços são surgentes com vazões que variam de 540 a 780 m<sup>3</sup>/h (SUDERHSA, 2007).

De modo geral, a URB na Bacia do Paraná apresenta o seguinte comportamento hidrogeológico: nas áreas aflorantes e de baixo confinamento, águas bicarbonatadas com predominância de cálcio e magnésio e baixo teor de sais dissolvidos; nas áreas de médio confinamento as águas se transformam de bicarbonatadas para sulfatadas com predominância de sódio e potássio e sais dissolvidos superiores a 500 mg/L; e nas regiões de alto confinamento, as águas passam a ser do tipo sulfatadas-cloretadas sódicas, com sais dissolvidos acima de 1.000 mg/L (SUDERHSA, 2007). Normalmente nas áreas de alto confinamento a ocorrência do íon fluoreto é bastante comum.

### **7.2.2. Unidade Hidroestratigráfica Piramboia**

A Unidade Hidroestratigráfica Piramboia (UHP) é a unidade basal do Sistema Aquífero Guarani e constitui um importante intervalo aquífero da Bacia do Paraná relacionado aos depósitos arenosos de ambiente eólico e fluvial. A espessura dos depósitos da unidade Piramboia são variáveis, alcançando 270 metros em algumas áreas aflorantes com máximo em torno de 350 metros na área confinada da bacia (SANTAANA *et al.*, 2009).

Segundo Soares *et al.* (2008) a UHP divide-se, de acordo com sua variação faciológica, em três ambientes deposicionais: dunas, interdunas (úmidas e secas) e canais fluviais. Estes ambientes, representados na Figura 17, são determinantes no comportamento hidrogeológico da unidade Piramboia. Observa-se também na mesma figura a variação na espessura da

unidade Piramboia, determinada por intenso controle estrutural, com uma faixa de maior espessura disposta ao longo da calha da Bacia do Paraná.

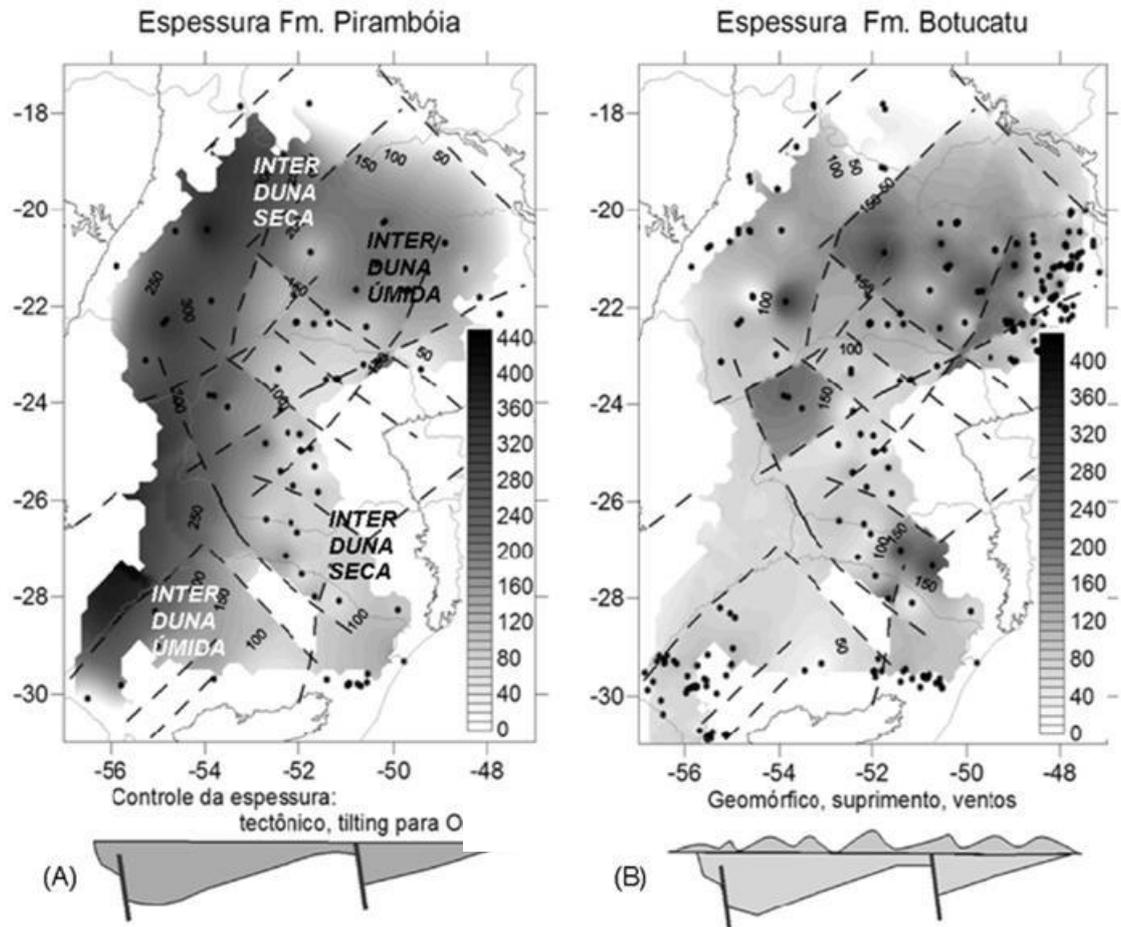


Figura 17. Mapas de espessura das formações Piramboia (a) e Botucatu (b) na Bacia do Paraná, adaptado de Soares *et al.* (2008). Na unidade Piramboia estão representados os domínios de interdunas secas e úmidas.

### 7.3. PRÉ-SAG

São consideradas unidades Pré-SAG o conjunto de unidades hidroestratigráficas cujas idades estão compreendidas entre o Permiano Médio até o Superior. Algumas unidades, com predominância de estratos arenosos, comportam-se como aquíferos, enquanto outras, de composição pelítica, compõem aquitardos.

### **7.3.1. Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto**

A Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto (UHRR) ocorre ao longo da faixa de afloramentos das rochas sedimentares gonduânicas em Santa Catarina. Sua área de ocorrência é contínua, tanto em afloramento como em subsuperfície (MACHADO, 2013). As características sucessões de intercalações areno-sílticas desta unidade localizam-se desde a região sul de Santa Catarina até a região norte do estado, sendo encontradas também no extremo oeste, como verificado nos poços profundos perfurados nos municípios de São Miguel do Oeste e São João do Oeste. Os diferentes conjuntos litológicos são divididos em porção superior, Morro Pelado, e porção inferior, Serrinha.

As litologias da subunidade Morro Pelado, consistem em lentes de arenitos finos, avermelhados, intercalados com siltitos e argilitos arroxeados. De acordo com Machado (2013), esta sucessão de camadas arenosas em subsuperfície pode apresentar espessuras superiores a 250 m. O contato superior com as Unidades Hidroestratigráficas Piramboia e Botucatu é dado por uma discordância erosiva (Figura 18). A subunidade Serrinha é constituída por arenitos finos, bem selecionados, intercalados com siltitos e argilitos cinza-verdeados, amarronzados, bordôs e avermelhados, podendo localmente conter lentes ou horizontes de calcário margoso.

A UHRR, na região de maior confinamento, comporta-se como um aquífero multicamadas, com fluxo poroso intergranular, devido às várias intercalações de camadas arenosas com lentes e leitos de síltico-argilosos. Segundo Machado (2013), a UHRR, nas áreas em que está recoberta pelo Sistema Aquífero Guarani e pelo Sistema Aquífero Serra Geral, caracteriza-se pelo confinamento e coeficiente de armazenamento diminuído.

Os poços perfurados para pesquisa de hidrocarbonetos na região em estudo (Figura 19) fornecem informações de espessuras e porosidade da UHRR, conforme mostra a Tabela 4.

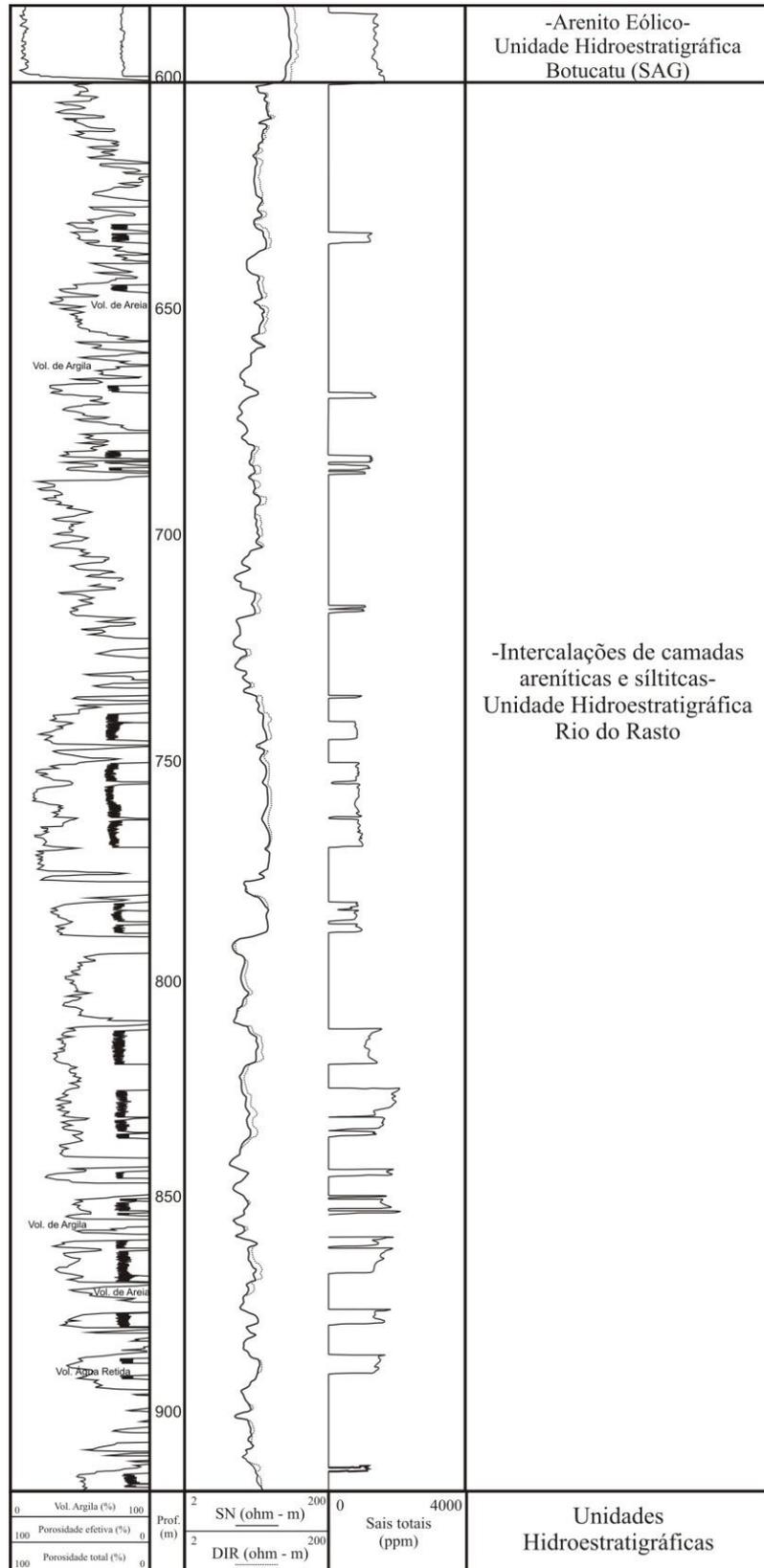


Figura 18. Perfil geofísico com delimitação das camadas arenosas e aquíferas no poço profundo do Itá Thermas Resort & Spa, SC (Fonte: MACHADO, 2013).

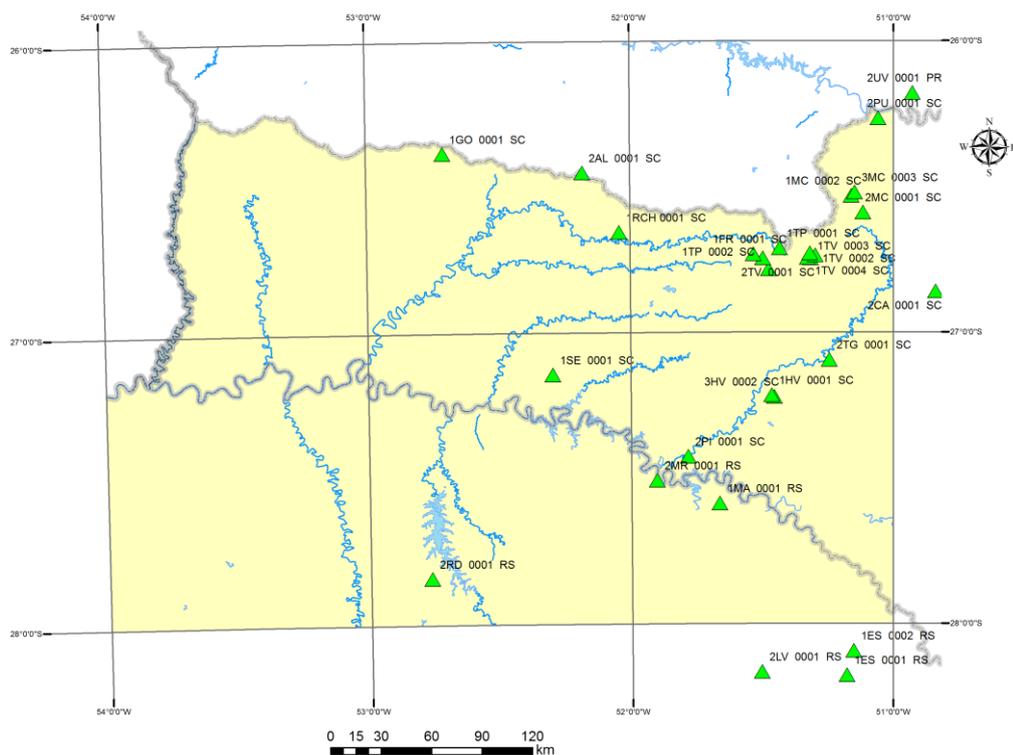


Figura 19. Mapa de localização dos poços perfurados para pesquisa de hidrocarbonetos presentes na região da área de estudo (Banco de Dados BDEP-ANP).

### 7.3.2. Unidade Hidroestratigráfica Teresina

A Unidade Hidroestratigráfica Teresina (UHT) aflora em uma extensa faixa sobre a Unidade Hidroestratigráfica Serra Alta. Na área confinada, as rochas síltico-argilosas predominam, com registro em todos os poços exploratórios e estratigráficos perfurados pela Petrobrás e Paulipetro. A UHT Teresina é caracterizada pela presença de pelitos, porém com predomínio de carbonatos oolíticos, coquinas e, ocasionalmente, estromatólitos. Suas litologias compreendem argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuros e esverdeados, ritmicamente intercalados com arenitos muito finos, cinza-claros. Quando alterada, as rochas apresentam cores em tons creme, violáceos, bordô e avermelhados. A presença de lentes e concreções carbonáticas, com formas elípticas e dimensões que podem atingir 2 m de comprimento são comuns (MACHADO, 2013).

Tabela 4. Informações da unidade hidroestratigráfica Rio do Rasto em poços de pesquisa para hidrocarbonetos (Petrobras e Paulipetro) na região da área em estudo. Fonte BDEP-ANP.

Poço	Local	Cota do topo (m)	Espessura (m)	Porosidade (%)
1GO-1SC	Galvão-SC	-588	620	nd
2-AL-1-SC	Abelardo Luz-SC	+376	233	nd
1-RCH-1-SC	Cel. Passos Maia-SC	-022	475	nd
2-RD-001-RS	Ronda Alta-RS	-680,5	650	nd
1-SE-1-SC	Seara-SC	-217	636	20
2-MR-001-RS	Marcelino Ramos-RS	-310	511	nd
2-PI-001-SC	Piratuba-SC	-281,2	524	16
1-MA-001-RS	Machadinho-RS	-129	535	nd
1-ES-002-RS	Esmeralda-RS	-158	380	18 a 23
2-LV-001-RS	Lagoa Vermelha-RS	-178	485	nd
1-HV-001-SC	Ervál Velho-SC	+035	576	nd
2-TG-001-SC	Tangará-SC	+127	428	nd
1-TP-001-SC	Três Pinheiros-SC	+451,2	590	nd
1-TP-003-SC	Três Pinheiros-SC	+250	716	nd
1-TV-002-SC	Taquara Verde-SC	+419,6	529	nd
2-MC-001-SC	Matos Costa-SC	+533	553	nd

A predominância de litologias finas imprime nesta unidade a característica de um aquífero pouco produtivo. Nas zonas de intenso confinamento, sua importância hidrogeológica é diminuta pelas grandes profundidades em que se encontra e pela qualidade da água com alta mineralização. Nomura (2012) refere-se à presença de cristais cúbicos provavelmente de halita detectadas por microscopia eletrônica de varredura, que reforçam a existência de camadas evaporíticas na Formação Teresina. De acordo com o mesmo autor, feições de dissolução posteriores à silicificação ocorrem nas fácies *chert* nodular brechado e de *packstone/grainstone* oolítico brechado, com esses nódulos representando evaporitos (gipsita e anidrita) substituídos por calcedônia. A Formação Teresina também inclui fácies terrígenas e carbonáticas com minerais autigênicos diversos como calcita, calcedônia, barita, celestita, analcima, dolomita e níveis interestratificados de esmectita-ilita.

### **7.3.3. Unidade Hidroestratigráfica Serra Alta**

Aflorando na porção leste do Estado de Santa Catarina a Unidade Hidroestratigráfica Serra Alta (UHSA) está posicionada exclusivamente sobre as litologias da Unidade Hidroestratigráfica Irati. Desta região até a divisa com o Estado do Rio Grande do Sul ocorre somente em subsuperfície sendo encontrada em todos os poços perfurados pela Petrobrás e Paulipetro.

Esta unidade é composta por uma sequência de folhelhos e siltitos cinza-escuros a pretos com fratura conchoidal. Localmente, contém lentes e concreções calcíferas, com formas elipsoidais que podem alcançar até 1,5 m de comprimento com 50 cm de largura. Segundo Machado (2013,) ocorrem localmente camadas de calcário oolítico acinzentado com extensa continuidade lateral e espessuras de até 3,5 m. Zalán *et al* (1990) apresentam o mapa de isópacas do Permiano Superior da Bacia do Paraná, que inclui as unidades hidroestratigráficas Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto, constituindo o principal embasamento do SAG Figura 20).

Da mesma forma que a unidade Teresina, esta unidade perde importância hidrogeológica pelas grandes profundidades em que se encontra e pela alta salinização das águas.

### **7.3.4. Unidade Hidroestratigráfica Irati**

A Unidade Hidroestratigráfica Irati (UHI) é composta por siltitos, argilitos, folhelhos, folhelhos piro-betuminosos e margas, frequentemente intercalados com delgados níveis de arenitos tabulares muito finos, quartzosos e com cimento carbonático, comumente registrando concreções carbonáticas. A unidade está registrada em todos os poços exploratórios e estratigráficos perfurados pela Petrobrás e Paulipetro.

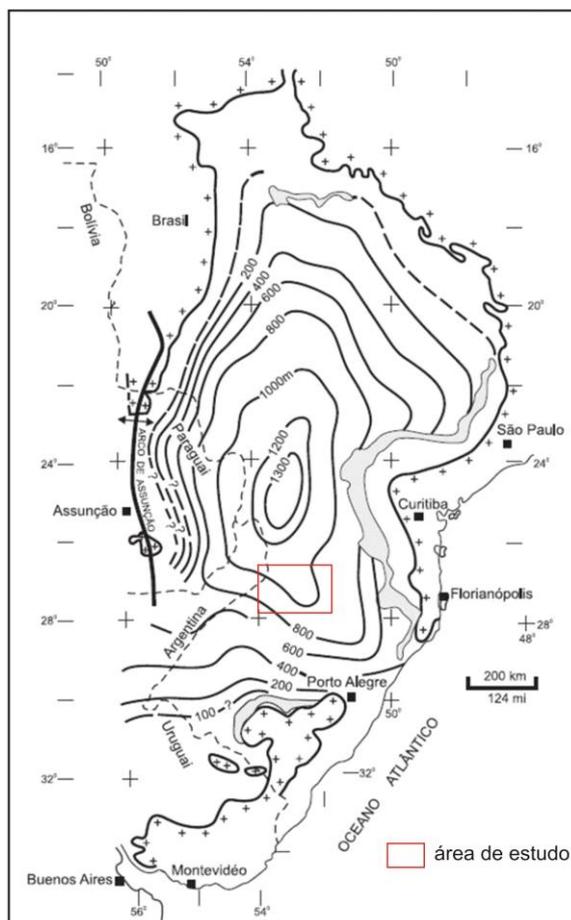


Figura 20. Mapa de isópacos do Permiano superior da Bacia do Paraná incluindo as unidades Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (adaptado de Zalán et al. , 1990).

A capacidade aquífera da UHI é insignificante, uma vez que apresenta uma espessura reduzida e o fluxo das águas se dá por meio de descontinuidades no acamamento dos siltitos, folhelhos e margas. Frequentes intrusões de diabásio, em forma de soleiras e diques fraturados, contribuem para a ocorrência de água subterrânea.

### 7.3.5. Unidade Hydroestratigráfica Rio Bonito

A Unidade Hydroestratigráfica Rio Bonito (UHRB) é representada por arenitos médios a finos, por vezes conglomeráticos, intercalados com folhelhos, siltitos, argilitos e níveis de carvão. A base desta unidade é composta por uma sucessão de camadas de arenitos arcoseanos com granulação muito grossa e arenitos conglomeráticos médios a finos com grãos angulares a subangulares, mal a moderadamente selecionados, dispostos em camadas lenticulares, amalgamadas ou separadas por intercalações de camadas de siltitos cinza a cinza

escuras e carbonosas e raras camadas de carvão (FREITAS *et al.*, 2008). O conjunto de camadas arenosas, que constitui o principal intervalo estratigráfico com características propícias à ocorrência de água subterrânea na unidade, possui espessuras médias de 10 metros, podendo estar ausente, em regiões de paleo-elevações do embasamento cristalino, ou atingir 30 metros em áreas de paleovales. Imediatamente acima do nível basal sucede-se um conjunto de camadas predominantemente de natureza pelítica e carbonosa no qual se destacam as camadas de carvão, que vêm sendo mineradas especialmente no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Sobreposto a este intervalo pelítico-carbonoso ocorrem outras camadas de quartzo-arenitos de granulação média a fina, grãos arredondados bem selecionados, intercalando camadas de pelitos carbonosos com pequenas espessuras. Estas camadas de quartzo-arenito compõem a outra possibilidade de desenvolvimento de aquífero dentro da Formação Rio Bonito. Os níveis pelíticos carbonosos se comportam como aquíferos intercalados entre os níveis aquíferos.

Conforme o aquífero se aprofunda, aumenta a capacidade específica da unidade que está relacionada com os valores importantes de porosidade, que, mesmo em profundidades da ordem de 3.000 m alcança valores de 20 % (MACHADO, 2013). No entanto, suas águas tornam-se salmouras com mais de 80.000 mg/L, conforme observações feitas nos relatórios dos poços do BDEP-ANP. A Tabela 5 apresenta o resultado analítico da água da Unidade Hidroestratigráfica Rio Bonito no intervalo de profundidade entre 2.528 e 2.569 metros do poço 1-RCH-1-SC em Passos Maia, SC (Fonte BDEP-ANP). A água com alta salinidade é do tipo cloretada- cálcica.

Tabela 5. Resultado analítico de água da unidade hidroestratigráfica Rio Bonito na profundidade entre 2.528 e 2.569 metros (Fonte BDEP-ANP).

Poço 1-RCH-1-SC.Laboratório CENPES/Petrobras (setembro de 1981)			
Na <sup>+</sup>	26.200 mg/L	Cl <sup>-</sup>	53.700 mg/L
K <sup>+</sup>	372 mg/L	Br <sup>-</sup>	43 mg/L
Ca <sup>++</sup>	7.350 mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	670 mg/L
Mg <sup>++</sup>	623 mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	177 mg/L
Fe total	23 mg/L	pH	6,4
Sr <sup>++</sup>	175 mg/L	STD	89.818 mg/L

## **8. ESTADO DA ARTE DOS ASPECTOS HIDROGEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS SERRA GERAL E GUARANI E DE SUAS ÁGUAS TERMAIS**

### **8.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais trabalhos sobre o comportamento hidrogeoquímico e isotópico das águas relacionadas aos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani na Bacia do Paraná.

### **8.2. HIDROGEOQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL**

As características hidrogeoquímicas do SASG têm sido foco de inúmeros estudos, que abordam de forma genérica a composição química das águas, com ênfase nos estados da região sul e no Estado de São Paulo. Os dados, de uma maneira geral, demonstram uma vinculação fraca com a compartimentação vulcânica da Bacia do Paraná e com as características litológicas dos locais amostrados.

Por outro lado, são escassas as informações hidrogeoquímicas das águas termais e, quando registradas, são abordadas superficialmente pelos autores.

Um dos primeiros registros de termalismo no SASG são feitos por Mohr (1936) em estudos das águas minerais do Rio Grande do Sul, em que são citadas as fontes termais de Iraí e Águas do Prado, hoje, município de Vicente Dutra. Segundo o autor, as primeiras análises físico-químicas das águas de Iraí e do Prado foram realizadas em 1917 por Alberto Albertini. As temperaturas encontradas para as três fontes do Mel em Iraí foram de 35,7; 36,2 e 34,7 °C, enquanto que nas Águas do Prado a temperatura registrada foi de 31,0 °C. Estas águas foram classificadas por Albertini como “alcalinas sulfurosas”.

De acordo com Mohr (1936), novas análises foram realizadas por Yunossuque Nemoto, em 1924, que mediu pela primeira vez a radioatividade das águas termais de Iraí, resultando no valor de 3,04 MMC (*milimicrocurie*), associando a radioatividade à processos de emissão de gás, sem especificar o elemento gasoso. Os resultados obtidos revelaram também a presença de pequenas quantidades de Li, Rb e Sr. Este mesmo analista classificou as águas como bicarbonatadas, cloretadas, sulfatadas, sódicas, radioativas.

Por fim, Mohr (1936) classifica as águas de Iraí e do Prado como termais bicarbonatadas cloro-sulfatadas, a mesma classificação atribuída às águas de Ilha Redonda e Taquaruçu, em Santa Catarina.

Lopes (1956) refere-se às águas termais que ocorrem junto ao vale do Rio Uruguai no lado catarinense - Fontes de Chapecó (município de Águas de Chapecó), Fontes da Prata (município de São Carlos), Ilha Redonda (município de Palmitos) e Fonte de Taquaruçu (município de Palmitos) - como águas sulfurosas bicarbonatadas cloro sulfatadas e com temperaturas de 34,2° C; 31,3° C; 37,6° C e 31,8° C, respectivamente.

Em relação às águas não termais do SASG, Rebouças e Fraga (1988) destacam águas no Estado de São Paulo com pH ácido e ligeiramente alcalino (pH entre 5 e 8,5), mineralização média de 200 mg/L. São registradas ocorrências anômalas com até 800 mg/L e casos isolados de altos teores de flúor (até 8 mg/L), relacionados pelos autores à proximidade de grandes lineamentos.

No Estado do Paraná as águas da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral são preferencialmente bicarbonatadas cálcicas, com registro de tipos sódicos relacionados com condições de fluxo ascendente a partir da Unidade Hidroestratigráfica Botucatu, conforme Fraga (1986). Este mesmo autor identifica fontes termais associadas a fraturas importantes no aquífero Serra Geral do Paraná, com predominância de águas bicarbonatadas sódicas ou tipos mistos, decorrentes de processos de mistura impostos por distintos condicionamentos hidrogeológicos.

Lisboa (1996) reconhece três unidades hidrogeológicas distintas para o Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul: Abóbada Oeste Aplainada, entre as bacias dos rios Ibicuí e Quaraí; Abóbada Central Densamente Dissecada, na bacia do Alto Rio Uruguai; Fachada Atlântica Dissecada, nas bacias dos rios Caí e Antas. Neste estudo o autor verificou a presença de águas de intemperismo das rochas vulcânicas nos três compartimentos, com características bicarbonatadas cálcicas. Na Abóbada Oeste Aplainada foi registrado um fácies de intemperismo com águas bicarbonatadas magnesianas, interpretado como decorrente de um tempo de residência maior. Nos três compartimentos foram observadas águas sódicas, cuja origem foi atribuída à mistura de águas de intemperismo das rochas vulcânicas com águas ascendentes do Sistema Aquífero Botucatu subjacente.

Estudos de Spiller (1998) nas águas termais de Ibirá (SP), localizadas no âmbito das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral revelaram afinidades alcalinas com teores extremamente elevados de carbonatos, sulfato, fluoreto, sódio, estrôncio e vanádio. O autor

associou a origem à circulação da água pelos basaltos amigdaloidais ricos em zeolitas (analcita, mordenita, estibinita e natrolita) e calcita, interceptados por sistemas de falhas de direção N-65°-E e N-45°-W de caráter regional.

Machado e Freitas (2000) demonstram que no meio oeste de Santa Catarina ocorrem águas predominantemente bicarbonatadas sódicas, magnésio-sódicas e magnésio-cálcicas. Alguns poços tubulares com até 150 metros de profundidade captam águas minerais termais com temperaturas entre 34,3 e 38,0 ° C, destacando-se as ocorrências de Águas de Chapecó, São Carlos e Ilha Redonda.

Amplio estudo hidrogeoquímico realizado por Freitas *et al.* (2002), a partir de cerca de 180 amostras coletadas no SASG, na região oeste catarinense, revelou que a composição química das águas dos aquíferos fraturados basálticos é predominantemente bicarbonatada cálcica e/ou magnesianas. Estas águas estão associadas com as áreas de recarga meteórica dos aquíferos fraturados e compreendem as águas de menor tempo de residência ou circulação. Em menor número ocorrem águas bicarbonatadas sódicas alcalinas que, segundo os autores, apresentam semelhança com as águas do SAG indicando processos de mistura. Os mesmos autores indicam que águas do tipo sulfatado sódico, também presentes, são relacionadas à mistura de águas provenientes de regiões de circulação ainda mais profunda, como do Aquífero Rio do Rasto. Por último ainda ocorrem, em menor número, águas de tipo cloretado, predominantemente sódicas, com pH alcalino e extremamente elevadas concentrações de sais dissolvidos. Segundo estes autores tais características sugerem alto tempo de residência nas unidades aquíferas da Formação Rio do Rasto ou de aquíferos permianos mais antigos, como Rio Bonito e Taciba (Membro Rio do Sul), cujas águas analisadas pela Petrobrás apresentaram altas concentrações de cloreto de sódio. Segundo Freitas *et al.* (2002), a ocorrência de termalismo nas águas captadas de poços tubulares e fontes no aquífero basáltico vem a reforçar a hipótese de interligação física entre o SASG e os aquíferos sotopostos.

Reginato e Strieder (2006) apresentam a caracterização hidroquímica de águas subterrâneas do SASG na região nordeste do Rio Grande do Sul e parte da bacia hidrográfica Taquari-Antas. As águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas possuem um controle litoquímico e estão relacionadas com os processos de intemperismo que atuam sobre as rochas vulcânicas da região. Já as águas bicarbonatadas sódicas e sulfatadas cálcicas ou magnesianas evidenciam a existência de condicionadores geotectônicos e morfoestruturais que seriam responsáveis pela ligação, circulação e consequente mistura das águas (SAG e SASG).

Betiollo (2006), em estudo hidrogeoquímico e estatístico realizado na porção nordeste do Rio Grande do Sul, demonstra que as águas do SASG nessa região são predominantemente

bicarbonatadas cálcicas e/ou sódicas, com incidência relativamente pequena de tipos bicarbonatados cálcico-magnesianos e raros sulfatados e cloretados. As águas predominantes apresentam baixo conteúdo iônico, tendo características relacionadas à composição das águas meteóricas. Os demais grupos mostraram maior ou menor grau de influência de aquíferos gonduânicos permo-triássicos.

Nanni (2008), lançando mão de técnicas de análise fatorial de componentes principais, análises tectônica, hidroquímica e isotópica, estudou a distribuição e o comportamento do fluoreto no SASG do Rio Grande do Sul. O autor verificou que, além da mistura de águas do SASG com o SAG, o enriquecimento deste elemento está relacionado com a combinação da recarga ascendente em condições de alto confinamento e longo tempo de residência, associados a zonas com pequena parcela de recarga meteórica. Também observou que águas com elevadas concentrações de fluoreto estão associadas com sistemas de falha.

Em estudo realizado na região nordeste do Rio Grande do Sul, Boff *et al.* (2006) demonstraram que há predominância de águas bicarbonatadas cálcicas no SASG do setor nordeste do Rio Grande do Sul. Segundo estes autores, os valores de resíduos de evaporação são, em geral, baixos e as concentrações são dependentes da tipologia e reatividade da rocha, do tempo de permanência da água na rocha e da profundidade dos poços de captação. Estas águas também registram expressivas concentrações de Sr, Li e Zn. A radioatividade registrada nas amostras de água obtidas a partir de análises *in loco* apresentam valores desde 0,12 a 13,62 unidades Mache.

Reginato *et al.* (2013) mencionam que as águas do SASG, na região nordeste do Rio Grande do Sul, geralmente apresentam caráter bicarbonatado cálcico ou magnesiano com condutividade elétrica inferior a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e pH menor que 7,5. Para os mesmos autores, o registro de águas bicarbonatadas sódicas e sulfatadas cálcicas em determinadas regiões indica conexão hidráulica com o SAG e conseqüente mistura de águas.

### 8.3. HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

Vários estudos hidrogeoquímicos evidenciam variações nas águas contidas em áreas aflorantes e confinadas do SAG, como apresentados por Silva (1983), Sracek e Hirata (2002), Souza (2004), Machado (2005), Gastmans e Kiang (2005), Gastmans (2007), Zanatta e Coitinho (2002), Montañó *et al.* (1998), Oliveira (2009), De Coud e Rocha (2000) e GEF (2009).

Estudos realizados por Silva (1983) no Estado de São Paulo demonstraram que nas áreas aflorantes do SAG predominam águas bicarbonatadas magnesianas e calcico-magnesianas. Em direção às áreas semiconfinadas, as águas evoluem para calcico-magnesianas e bicarbonatadas cálcicas. Na porção oeste, onde o SAG apresenta o maior grau de confinamento e conseqüentemente maior temperatura, as águas são bicarbonatadas sódicas a cloro-sulfatadas sódicas.

Rosa Filho *et al.* (1987) observaram, através da análise de elementos maiores, a contribuição das águas do SAG às águas do SASG em vários locais do Planalto Paranaense, propiciando, a surgência de águas termais. Tais conclusões corroboram com as observações feitas anteriormente por Fraga (1986) na mesma região.

Dias *et al.* (2002), dividiram as águas do SAG no Estado de São Paulo em três famílias: a) águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas na porção confinada do SAG, com pH variável entre 5,3 e 8,5 e temperatura entre 21°C e 36°C, neste caso, com 75% dos valores menores que 28°C; b) águas bicarbonatadas sódicas na porção confinada do SAG com valores de pH predominantemente alcalino, 100% dos valores são maiores que 8,5; o resíduo seco entre 93 e 222 mg/L e a temperatura variando de 23°C a 34°C; c) águas cloro-sulfatadas cálcicas ou magnesianas – que ocorrem na porção livre do SAG, com valores de pH ácido, variando de 4,8 a 7,0, com 75% dos valores inferiores a 6,2. O resíduo seco apresenta concentrações sempre menores que 157 mg/L, com 75% dos valores menores que 54 mg/L, com temperatura variando de 20°C a 27°C, com 75% dos valores menores que 24°C.

Souza (2004) descreve as características físico-químicas das águas do SAG nas zonas de alto confinamento no Estado do Paraná. Geralmente a relação entre  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  é baixa, o pH é alcalino, determinado pela concentração de bicarbonato e carbonato, e as temperaturas são superiores a 26° C. Águas com menores teores de cloreto estão associadas às menores temperaturas e também apresentam maior concentração de sulfetos e sulfatos. Ainda de acordo com o autor, o ambiente desértico de deposição dos arenitos Botucatu/Piramboia propiciou a deposição de precipitados salinos, incluindo os sulfatos.

Gastmans *et al.* (2010) apontam a ocorrência de concentrações anômalas de arsênio nas águas do SAG na fronteira entre Argentina, Brasil e Uruguai. As ocorrências de arsênio nesta área estão associadas a águas subterrâneas com pH superior a 8,0 e do tipo bicarbonatadas sódicas. Estes autores relacionam a anomalia ao processo de desorção, a partir de arsênio adsorvido em óxidos e hidróxidos de ferro, em função do elevado pH e apontam sua origem nos arenitos das unidades subjacentes ao SAG.

Uma avaliação pormenorizada e regional das principais características hidroquímicas e isotópicas do SAG é apresentada por LEBAC (2008). Segundo os autores, do ponto de vista hidroquímico, considerando-se a escala de trabalho e as simplificações inerentes, são reconhecidas quatro principais zonas hidroquímicas para o SAG (Figura 21). A Zona I caracteriza-se pela ocorrência de águas principalmente bicarbonatadas cálcicas, e subordinadamente águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas e cálcico-sódicas, com pouca mineralização, refletida, principalmente, nas baixas condutividades elétricas observadas. Esta zona está localizada próxima à faixa de afloramentos, contornando a zona de confinamento do SAG. Apresenta larguras variáveis, sendo mais estreita na região leste, podendo atingir cerca de 150 Km na região oeste, principalmente no Estado de Mato Grosso do Sul. A Zona II tem como característica a ocorrência de águas principalmente bicarbonatadas sódicas, onde o SAG encontra-se confinado e com maior grau de mineralização, refletido principalmente nas médias condutividades elétricas observadas. A Zona III é marcada pela presença de águas principalmente sulfatadas cloretadas sódicas, subordinadamente com presença de bicarbonato, altamente mineralizadas, o que se reflete principalmente nas altas condutividades elétricas. Esta zona é coincidente com a calha central da Bacia do Paraná e inflete na direção do lineamento do Rio Uruguai. A última Zona (IV), foi caracterizada através de observações indiretas, em perfis elétricos de poços de petróleo perfurados nas províncias de Entre Rios, Chaco, Formosa e Santiago del Estero na Argentina. Segundo os autores, trata-se possivelmente de águas cloretadas sódicas, com alta mineralização, o que determina a baixa resistividade elétrica observada nos perfis geofísicos ( $<2\Omega\text{m}$ ), permitindo estimar condutividades elétricas superiores a 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Nas zonas confinadas a mistura de águas com aquíferos situados acima ou abaixo do SAG ocorre frequentemente e depende das condições potenciométricas relativas, conforme observado por Freitas *et al.* (2002), Machado *et al.* (2002), Nanni (2008).

Quando o nível potenciométrico do SAG é inferior à base do aquífero Serra Geral, ocorre a mistura de águas e conseqüente alteração química, promovida pelo aporte de fluxos descendentes através de descontinuidades (condutores hidráulicos) das rochas vulcânicas. De modo contrário, em regiões onde o nível potenciométrico do SAG é superior à base do Aquífero Serra Geral, ocorre fluxo ascendente, e as águas do SAG misturam-se às águas do aquífero superior (BITTENCOURT *et al.*, 2003; CORRÊA, 2000). Ainda pode ocorrer uma terceira forma de mistura de águas envolvendo o SAG, quando o nível potenciométrico das unidades inferiores ao mesmo é maior que sua base Machado *et al.* (2002), Oliveira (2009),

LEBAC (2008). Neste caso há aporte de sais promovido pela solubilização de minerais das unidades sotopostas ao SAG, como a Formação Rio do Rasto, Teresina, Irati, Rio Bonito, etc.

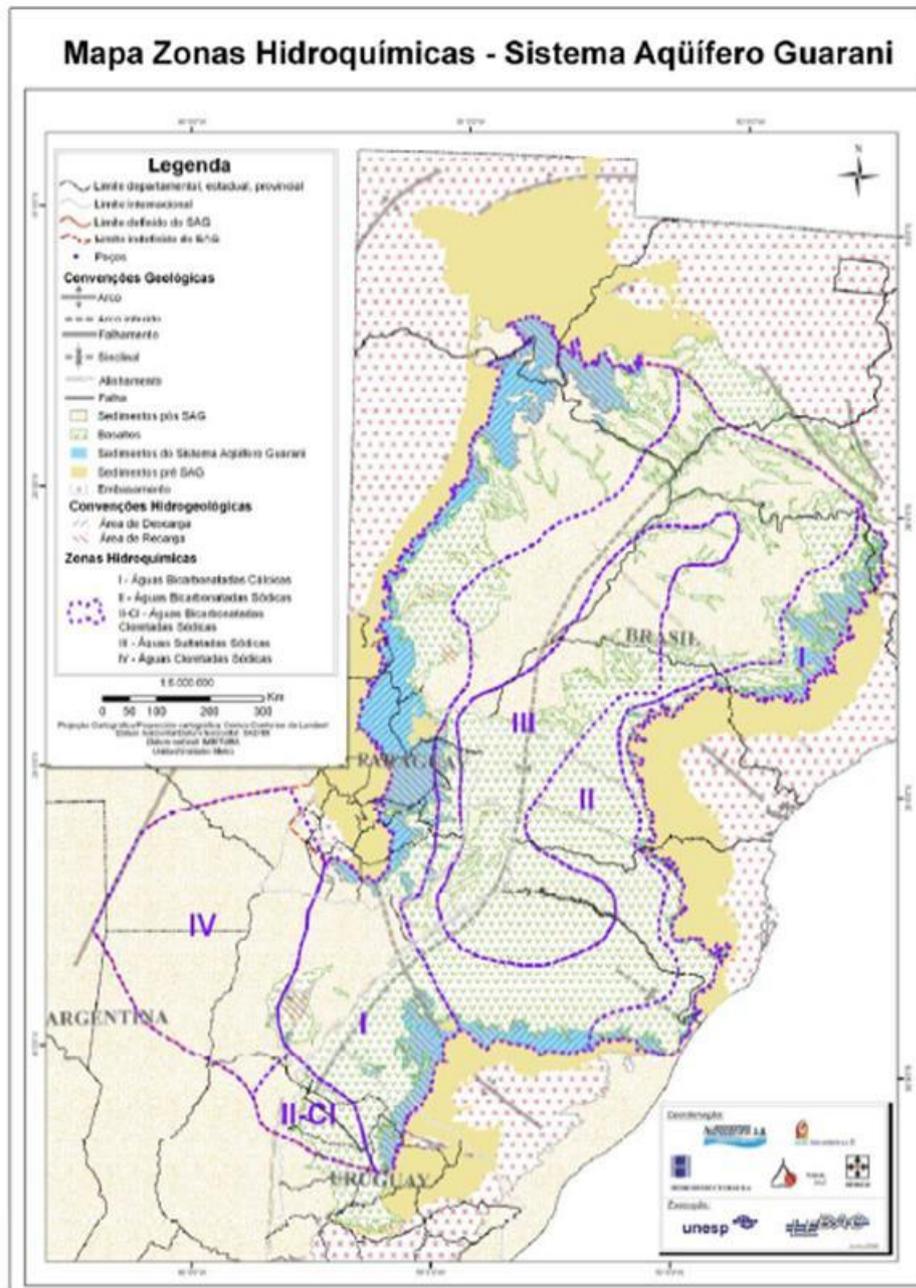


Figura 21. Mapa das principais Zonas Hidroquímicas do SAG (LEBAC, 2008).

Da mesma forma, Manzano e Guimaraens (2008) apresentam um modelo de evolução hidrogeoquímica para o SAG (Figura 22), muito semelhante ao de Machado *et al.* (2002), mas descrevem detalhadamente os processos geoquímicos envolvidos de acordo com os diferentes graus de confinamento.

O estudo mais abrangente sobre a evolução hidrogeoquímica do SAG é apresentado por Manzano e Guimaraens (2008), baseado em dados provenientes do Projeto Guarani em conjunto com informações de trabalhos científicos e teses realizados previamente na área. Os autores avaliaram as informações através de oito perfis, cuja localização pode ser visualizada na Figura 23. A metodologia empregada nesse estudo baseia-se na avaliação e determinação das fácies hidroquímicas, com o auxílio dos diagramas de Schöeller e Piper; cálculo das principais razões iônicas; avaliação da relação entre os principais cátions e ânions; identificação dos processos hidrogeoquímicos e das reações de transferência de massa existentes; cálculos de balanços de massa e estudos termodinâmicos de saturação mineral. Ao longo das seções analisadas foram reconhecidas algumas fácies hidroquímicas, correspondendo ao zoneamento hidroquímico apresentado na Figura 22 de LEBAC (2008). Suas principais características são apresentadas na Tabela 6. Segundo os autores as fácies hidroquímicas A, B e C, localizadas respectivamente nas Zonas Hidroquímicas I, II e III (LEBAC, 2008), apresentam certa relação com a rede de fluxo das águas subterrâneas, uma vez que aparecem sempre ordenadas, desde as áreas de afloramento e de recarga até os setores onde o SAG encontra-se confinado.

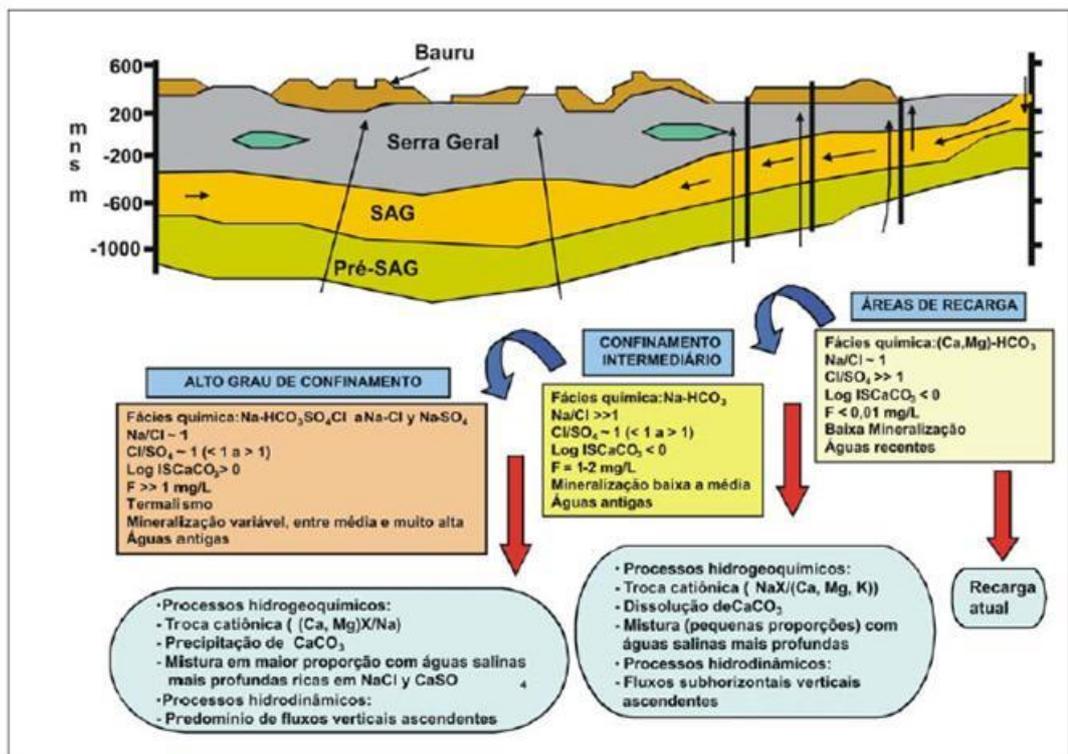


Figura 22. Modelo de evolução hidrogeoquímica do SAG proposto por Manzano e Guimaraens (2008).

As águas do Tipo A ocorrem nas áreas de recarga, ou próximo a elas no sentido do fluxo, correspondendo a águas com pequena evolução hidroquímica, com composição muito próxima às águas de recarga. As águas do Tipo B ocorrem em posições intermediárias do setor confinado do SAG e representam a evolução hidroquímica das águas do Tipo A, através de reações de troca iônica e dissolução de minerais carbonáticos presentes no arcabouço do aquífero. Os autores ainda consideram a possibilidade de influência de águas dos aquíferos sotopostos ao SAG em sua composição química. Já as águas do Tipo C estão presentes onde o SAG apresenta as condições mais severas de confinamento, representando uma mistura das águas do Tipo B com águas mais salinizadas, provenientes de aquíferos subjacentes.

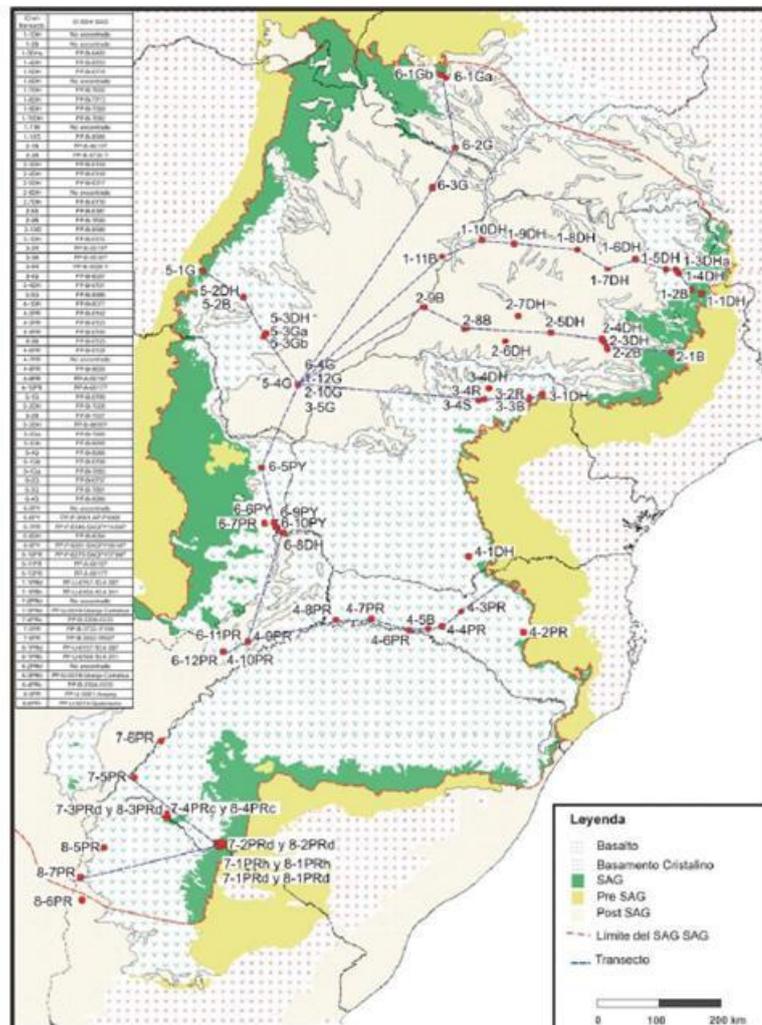


Figura 23. Localização das seções hidrogeoquímicas (T1 a T8) avaliadas por Manzano e Guimaraens (2008). Modificado de LEBAC (2008).

Manzano e Guimaraens (2008) estudaram o comportamento do sódio e do cloreto conjuntamente com o comportamento da razão  $rNa/rCl$  ao longo das principais linhas de fluxo. Na maioria das águas analisadas esta razão é  $> 1$ , mas apresenta comportamentos bem

distintos: o primeiro, de aumento das concentrações de sódio relativamente às de cloro, com o aumento da salinização dessas águas, correspondendo às águas do Tipo B; e o segundo, com relação  $rNa/rCl$  próxima a 1, indicando a possibilidade de misturas de águas ricas em cloreto de sódio, representando as águas do Tipo C.

Tabela 6. Fácies hidroquímicas do SAG identificadas nas seções segundo Manzano e Guimaraens (2008).

Grupo	Classificação	Sub-Grupos	Seções	CE (mS/cm)	pH	Zona Hidroquímica
TIPO A	Bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas magnesianas	A <sub>1</sub> : Na>Cl	1 a 6	< 150	4 a 8	Zona I
		A <sub>2</sub> : Na≤Cl	7 e 8			
TIPO B	Bicarbonatadas Sódicas	B <sub>1</sub> : Cl<SO <sub>4</sub>	1 a 8	Entre 200 e 600	7 a 10	Zona II e IIA
		B <sub>2</sub> : Cl>SO <sub>4</sub>	1 a 6			
TIPO C	Bicarbonatadas Sulfatadas Cloretadas Sódicas, Sulfatadas Sódicas e Cloretadas Sódicas	C <sub>1</sub> : Cl<SO <sub>4</sub>	1 a 4 e 8	> 550	7 a 9	Zona III
		C <sub>2</sub> : Cl>SO <sub>4</sub>	1, 2, 4, 6 e 8			
		C <sub>3</sub> : Na-Cl ou Na SO <sub>4</sub>	1, 2, 4 e 6			
TIPO D	Cloretadas Cálcicas ou Cloretadas Magnesianas		7 e 8	Entre 30 e 240	5 a 6	Zona I

Estes autores explicam o excesso de sódio sobre o cloreto nas águas do primeiro grupo relacionando à dissolução de albita; e a troca iônica entre o sódio e os elementos cálcio e magnésio, indicada principalmente pela relação de excesso de alcalinidade sobre os cátions e do excesso de sódio sobre o cloreto das águas do SAG. Também estabelecem que a origem do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> nas águas mais salinas está relacionada principalmente à dissolução de minerais associados a materiais evaporíticos ricos em sulfatos e cloretos. A relação entre o cálcio e alcalinidade total indica dois grupos distintos de amostras analisadas pelos autores. No primeiro grupo há uma correlação direta entre a concentração de cálcio e a alcalinidade total, indicando que a presença deste cátion é fundamentalmente produto da dissolução de carbonatos. No segundo grupo de amostras apresenta uma evolução geoquímica associada à troca catiônica com o sódio. Segundo os autores, nas zonas de recarga, a dissolução de carbonatos faz com que ocorra um aumento linear em ambos os parâmetros, enquanto na zona confinada, apesar do aumento do pH, observa-se uma diminuição na concentração de cálcio, fruto da troca iônica com o sódio.

Sobre o comportamento do flúor, Manzano e Guimaraens (2008) associam, a exemplo de vários autores, as altas concentrações às águas com elevados teores de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$ . As águas com altos teores de flúor são aquelas onde a relação  $r\text{Cl}/r\text{SO}_4$  é próxima a 1. Desta forma, sugerem que sua origem mais provável está relacionada à contribuição de águas salinizadas dos aquíferos subjacentes ao SAG.

Gastmans *et al.* (2010) definem que os mecanismos responsáveis pela evolução hidrogeoquímica do SAG em sua porção noroeste está relacionada à dissolução de feldspatos e remoção do cimento carbonático dos arenitos. A troca catiônica é responsável pelo incremento de  $\text{Na}^+$  e decréscimo de  $\text{Ca}^{2+}$ , enquanto o enriquecimento de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  é derivado dos aquíferos subjacentes.

Diversos estudos isotópicos ( $^{16}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) têm sido realizados a fim de investigar o fluxo, a recarga, a origem, a idade aparente e a dinâmica do SAG (SILVA, 1983; KIMMELMANN *et al.*, 1989; KIMMELMANN, 1991, SRACEK; HIRATA, 2002).

Bonotto (1997) apresenta uma revisão das técnicas isotópicas realizadas nos aquíferos Botucatu-Piramboia, na Bacia do Paraná, incluindo informações sobre a utilização de isótopos naturais de  $^{234}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ , ressaltando que estes isótopos permitem a obtenção de idades superiores às previstas pelo método  $^{14}\text{C}$  (idades até 40.000 anos), ou seja, até 500.000 anos.

No entanto os primeiros estudos avaliaram apenas o comportamento localizado dos isótopos ambientais em pequenas porções do SAG. Em 2008 foi disponibilizado o resultado de um amplo estudo isotópico realizado no âmbito do Projeto Aquífero Guarani, e financiado pela Seção de Hidrologia Isotópica do Organismo Internacional de Energia Atômica. Este estudo apresenta uma visão regional integrada do SAG e as possíveis explicações para os processos isotópicos ocorridos na evolução das águas da unidade (LEBAC, 2008).

As análises isotópicas de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  foram efetuadas em dois laboratórios, as amostras referentes à Zona Norte foram realizadas no Laboratório de Isótopos Ambientais da Comissão Chilena de Energia Nuclear, enquanto que amostras coletadas na Zona Sul, foram realizadas no Laboratório de Isótopos Ambientais do INGEL, na Argentina. As análises de Trítio ( $^3\text{H}$ ) foram realizadas no Laboratório de Trítio da Comissão Nacional de Energia Nuclear, em Belo Horizonte. Segundo (LEBAC, 2008), os valores isotópicos nas águas subterrâneas do SAG comportam-se de maneira distinta, comparando-se as zonas Norte e Sul. Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  variam de -5,3 a -10,2‰, na Zona Norte, e entre -4,3 e 7,0‰, na Zona Sul. Os valores de  $\delta^2\text{H}$  oscilaram entre -33 a -72‰ na Zona Norte e de -31 a -44‰ para Zona e Sul. As águas da Zona Norte agrupam-se ao longo da reta meteórica global, indicando, segundo os autores, que estas não sofreram processos de evaporação nas zonas de recarga (Figura 24). As amostras da Zona

Sul agrupam-se ao longo de uma reta levemente deslocada em relação à reta meteórica global. Estes autores interpretam o fato como pelas possíveis diferenças existentes entre as massas de ar que trouxeram as precipitações para esta região (Figura 24-B). Observa-se que na porção confinada do SAG localizada nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, as águas mostram um maior empobrecimento em relação ao isótopo de oxigênio, com valores menores que -8‰ para  $\delta^{18}\text{O}$ . Segundo os autores, estas águas não seriam de origem recente, tendo sido recarregadas em condições climáticas mais frias e provavelmente mais úmidas que as condições climáticas atuais.

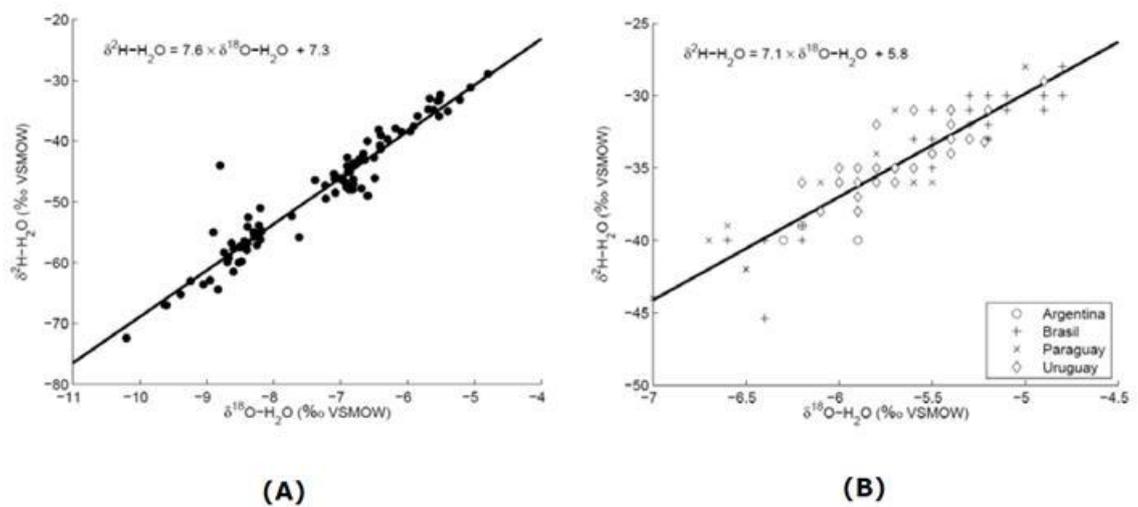


Figura 24. Relação  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta^2\text{H}$  nas águas subterrâneas do SAG. (A) Zona Norte e (B) Zona Sul. Modificado de Aravena (2008) apud LEBAC (2008).

Em relação ao isótopo de  $^{13}\text{C}$ , há uma grande variação dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  nas águas do SAG, de cerca -20‰ a -5‰ (Figura 25), com os valores menores coincidentes com as áreas de recarga e os valores maiores ao longo das linhas de fluxo, indicando claramente a ocorrência de reações de dissolução do cimento carbonático presente na rocha (LEBAC, 2008). O comportamento do isótopo  $^{14}\text{C}$  mostra uma grande variação de mais de 100% de Carbono Moderno (PCM) até valores inferiores a 2 PCM. Os autores afirmam que a maior quantidade de carbono moderno está relacionada com as águas coletadas nas áreas de recarga e/ou próximo a elas, enquanto as águas mais empobrecidas relacionam-se às áreas de maior confinamento do SAG (Figura 26).

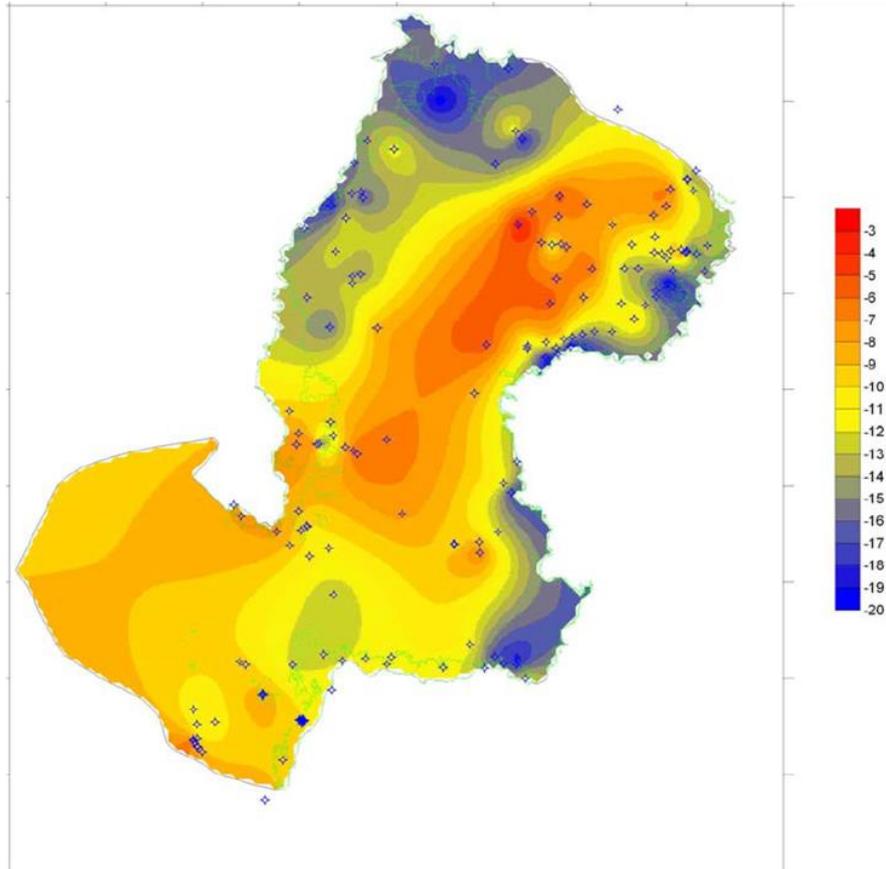


Figura 25. Mapa de concentrações de  $\delta^{13}\text{C}$  nas águas do SAG (LEBAC, 2008).

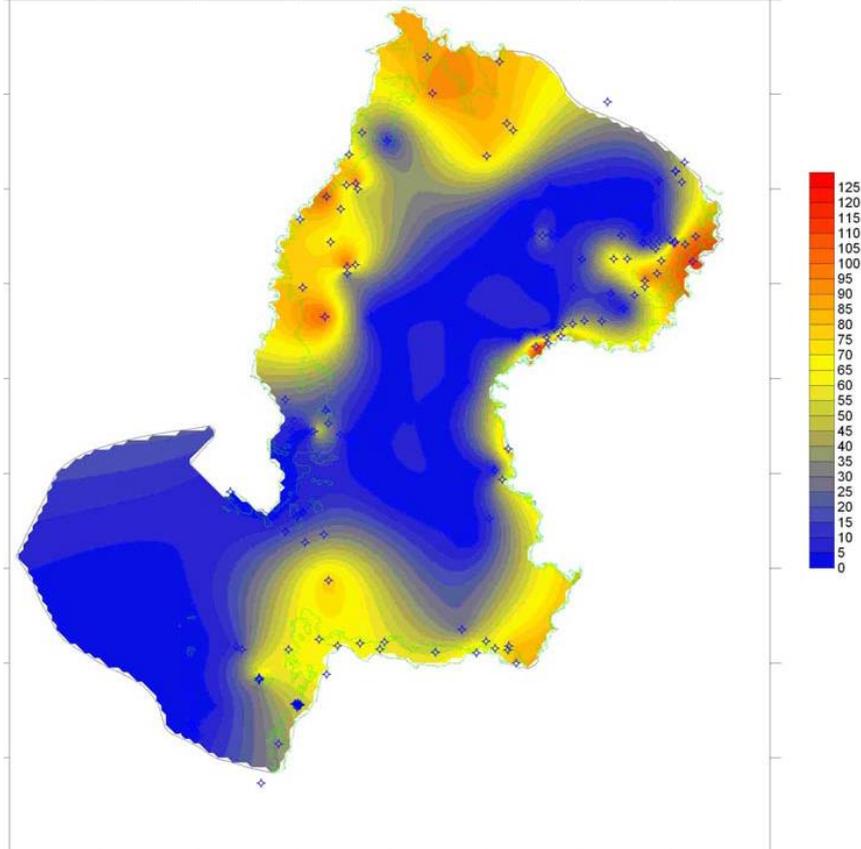


Figura 26. Mapa de distribuição de  $^{14}\text{C}$  nas águas do SAG. (LEBAC, 2008).

Segundo LEBAC (2008), o estudo isotópico realizado indica a presença de águas com tempo de permanência maior que 10.000 anos na zona de confinamento do SAG, inclusive com a possibilidade de que algumas dessas águas apresentem idades superiores ao limite de detecção do método utilizado (Carbono-14). Nas áreas de afloramento e proximidades as idades verificadas estão na faixa do recente.

De acordo com Aggarwall *et al.* (2013), estudos isotópicos utilizando o método do  $^{81}\text{Kr}$  no SAG, na região do oeste do Estado de São Paulo e norte do Paraná, revelaram idades que variam de cerca de  $70 \times 10^3$  a  $570 \times 10^3$  anos, sendo as mais antigas nas áreas de maior confinamento como Presidente Prudente e Maringá.

## **9. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS**

### **9.1. INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta inicialmente a proposição de um modelo conceitual da hidrogeologia da área de estudo e a hipótese da pesquisa. Posteriormente é realizada uma descrição resumida do arcabouço hidrogeológico da área de estudo é apresentada juntamente com os dados de poços utilizados na área de estudo e suas principais características. Depois aborda-se os resultados da análise exploratória de dados (AED) no SASG, na área de sua ocorrência nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, utilizando as medidas de campo de Condutividade Elétrica realizada *in loco* nos poços. Posteriormente a análise de lineamentos morfoestruturais e sua relação com a hidrogeoquímica é avaliada em conjunto com a superfície potenciométrica do SAG. Os resultados analíticos nas águas dos poços do SAG e SASG são submetidos às técnicas de estatística multivariada, modelamento hidrogeoquímico e interpretação de dados de isótopos estáveis para validar o modelo conceitual hipotético apresentado. A aplicabilidade do geotermômetro de sílica é também avaliada para a determinação da profundidade de circulação das águas termais. Finalmente são tecidas considerações finais e conclusões da pesquisa, bem como recomendações a estudos futuros.

### **9.2. MODELO CONCEITUAL E HIPÓTESE DA PESQUISA**

O SASG aflora em toda a área de pesquisa, que abrange a região oeste de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul, com espessuras variando de 369 metros, registrada no

poço IV-163 no Horto Florestal em Itá, até 1.462 metros no poço JP-714 em São Lourenço do Oeste. No Rio Grande do Sul, o poço 2RD-1-RS da Paulipetro, em Ronda Alta, apresenta uma espessura de rochas vulcânicas de 1.178 metros. Sua produtividade varia de muito baixa a moderada, segundo os critérios adotados na cartografia hidrogeológica do Brasil pela CPRM (DINIZ *et al.*, 2014). O SAG e o Pré-SAG não afloram na área estudada, exceto em sua porção nordeste, mais especificamente na divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina. O mapa potenciométrico do SAG, de acordo com LEBAC (2008), compõe, juntamente com as unidades aflorantes do SASG, a hidrogeologia da área resumida na Figura 27.

O modelo conceitual de armazenamento e circulação de água no SASG para a área de estudo está calcado na presença de discontinuidades em litologias de suas unidades hidroestratigráficas e o gradiente hidráulico envolvido. As feições que tornam a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral um aquífero são: a presença de solo/manto de alteração, contatos entre derrames, fraturas de resfriamento, juntas de alívio de pressão, disjunção vertical, disjunção horizontal, diáclases, brechas, arenitos interderrames e falhas. O gradiente hidráulico é o que rege a circulação da água nos espaços decorrentes das estruturas acima mencionadas.

Os resultados obtidos por Freitas *et al.* (2003) em estudo estatístico sobre entradas d'água em 2.714 poços do SASG, no oeste catarinense, demonstram que a circulação de água no SASG limita-se à profundidade máxima de 310 metros, com média de 117 metros. A grande maioria das entradas d'água nos poços (87,47 %) ocorre até a profundidade de 150 metros e somente 1,47% das contribuições estão acima da profundidade de 150 metros (Figura 28). No lado do Rio Grande do Sul os poços que captam o SASG na área de estudo com maiores profundidades ocorrem em Áurea (468 metros), Frederico Westphalen (450 metros) e Caiçara (450 metros), sendo todos poços secos ou com pequenas ou moderadas vazões. A totalidade de água produzida por um poço em aquíferos fraturados advém de apenas uma, ou então de poucas discontinuidades, posicionadas em meio a um domínio de rocha compacta, praticamente impermeável. As vazões serão tanto maiores quanto mais se estendem as discontinuidades abaixo do nível estático; logo é muito mais dependente da posição relativa das discontinuidades, do que propriamente da profundidade e do poço.

Normalmente, com o aumento da profundidade, as discontinuidades tendem a desaparecer em razão da pressão litostática e há forte queda da produção em poços de aquíferos fraturados, como o SASG. Freitas *et al.* (2003) afirmam, baseado no levantamento de 2.714 poços no SASG, que há forte diminuição nas vazões e vazões específicas em poços com profundidades superiores a 150 metros (Figura 29).

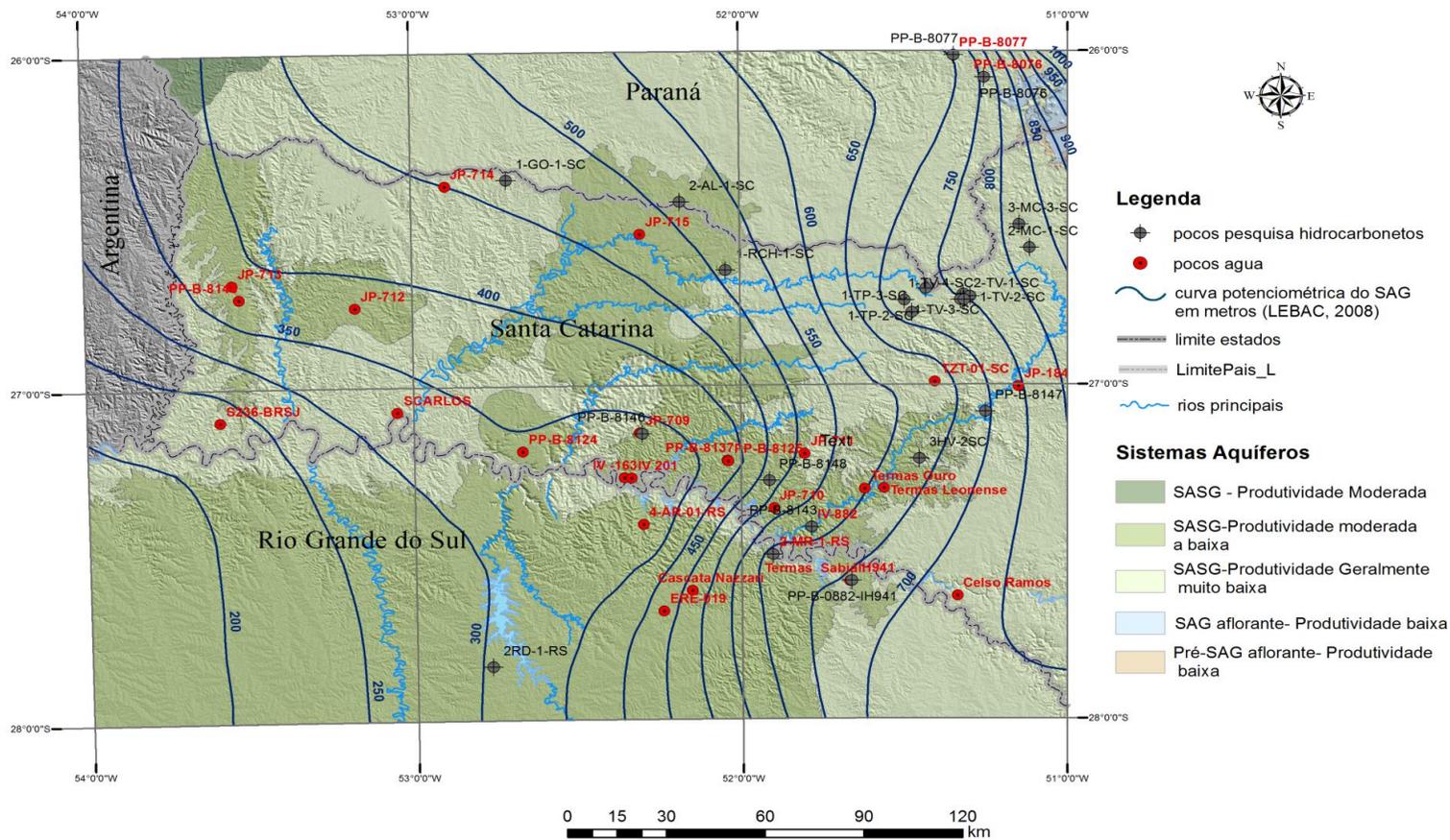


Figura 27. Hidrogeologia simplificada da área (Modificado de CPRM, 2014) com poços profundos que foram perfurados para pesquisa de hidrocarbonetos (BDEP-ANP) e para captação de água principalmente do SAG.

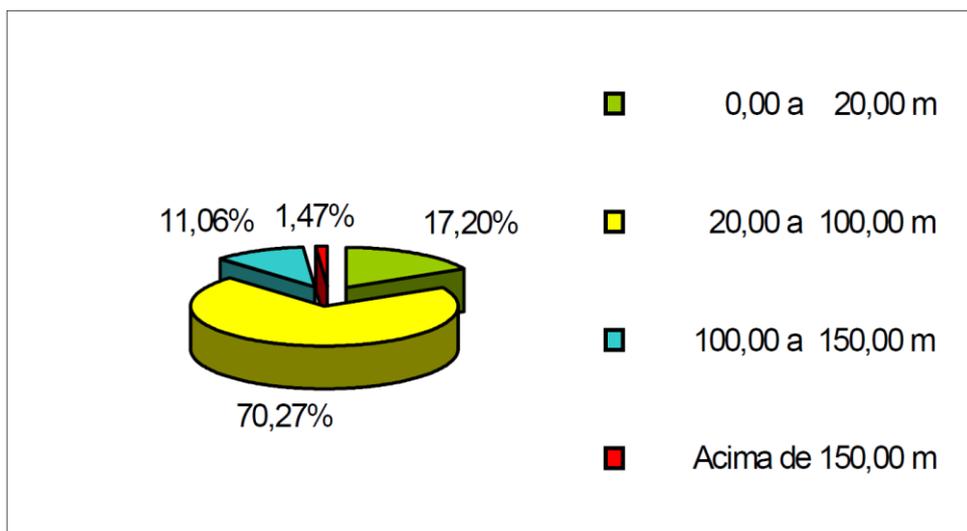


Figura 28. Percentual dos intervalos de entrada de água nos poços que captam o SASG no oeste de Santa Catarina (Adaptado de Freitas *et al.*, 2003).

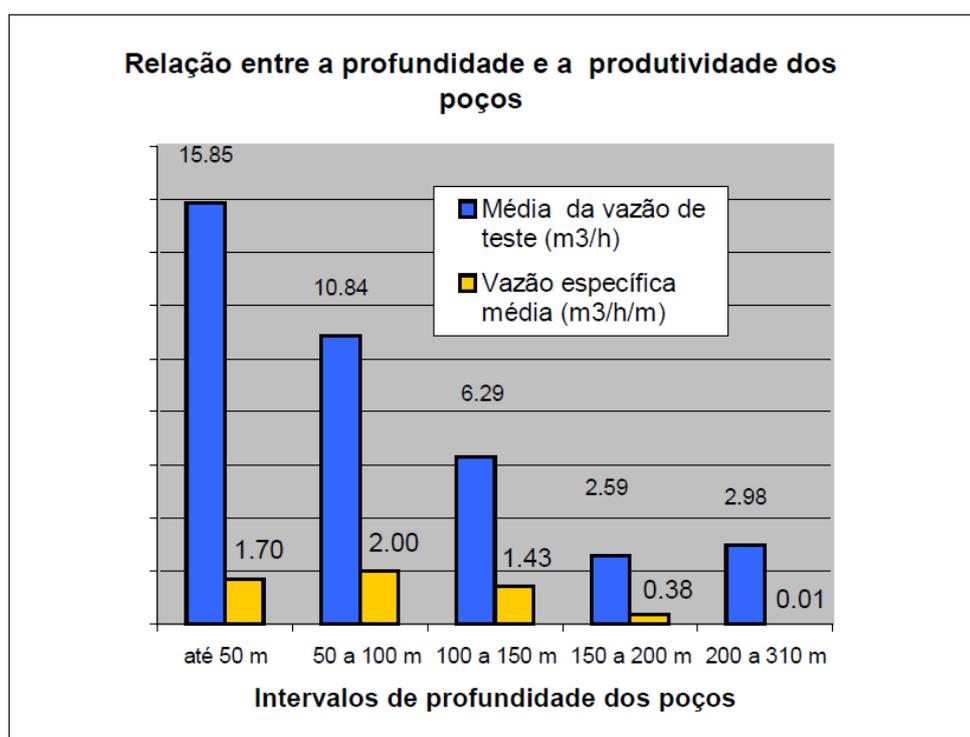


Figura 29. Diminuição da produtividade dos poços que captam exclusivamente águas do SASG no oeste de Santa Catarina com o incremento da profundidade (Adaptado de Freitas *et al.*, 2003).

Na área da pesquisa propõe-se o seguinte modelo conceitual para a área em estudo:

- A Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral desenvolve comportamento de aquífero fraturado, denominado SASG, através de falhas, fraturas, contatos entre derrames, disjunção horizontal e arenitos interderrames de origem vulcanogênica;

- A circulação de água no SASG ocorre até a profundidade limite de 400 metros;
- A principal recarga é por excedente hídrico, decorrente da precipitação pluviométrica, que percola através do manto de alteração;
- As maiores potencialidades hidrogeológicas encontram-se em regiões onde há vários derrames superpostos localizados em platôs e platôs entalhados pouco dissecados, interceptados por lineamentos regionais;
- As piores condições hidrogeológicas se desenvolvem em derrames com espessa zona central, derrames estes localizados em terrenos declivosos e muito dissecados, que, mesmo interceptados por fraturas, demonstram baixa favorabilidade;
- A pressão litostática sobre os arenitos componentes do SAG e Pré-SAG é aliada às condições potenciométricas das unidades sedimentares faz com que as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral comportem-se como aquícludes confinantes;
- Nas áreas onde os falhamentos regionais interceptam o pacote de rochas vulcânicas e sedimentares e os níveis potenciométricos do SAG e Pré-SAG são maiores que o do SASG, ocorre o fenômeno da recarga ascendente;
- As principais consequências da recarga ascendente consistem na presença de águas termais hospedadas na unidade hidroestratigráfica Serra Geral e na mistura de águas em sua zona produtora.

Desta forma a hipótese de trabalho fundamenta-se na salinização das águas do SASG por recarga ascendente, através de estruturas tectônicas em condições hidráulicas favoráveis, derivada das formações geológicas sotopostas ao Grupo Serra Geral, na Bacia do Alto Rio Uruguai no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul e Oeste do Estado de Santa Catarina.

### 9.3. AVALIAÇÃO REGIONAL DOS VALORES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA AS ÁGUAS DO SASG

Segundo Custódio e Llamas (1983), a condutividade elétrica (CE) de uma água consiste na capacidade que ela tem de conduzir eletricidade, estando diretamente relacionada à quantidade de sais dissolvidos (STD) sob a forma de íons. A unidade padrão de medida da condutividade no SI (Sistema Internacional) é a Siemens (S) e os valores para as águas subterrâneas são referidos ao milionésimo do S/cm, ou seja,  $\mu\text{S/cm}$ , a uma temperatura padrão de 25°C. Tal parâmetro é uma importante medida de investigação hidrogeológica que não necessita grandes preparações prévias e nem equipamentos sofisticados.

A condutividade elétrica medida em 7.620 poços que captam o SASG na sua área de ocorrência nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina tem sua estatística descritiva

exibida na Tabela 7. O menor valor medido, 10,31  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , refere-se a um poço na Linha Guaritinha em Palmeira das Missões, RS, com pH de 5,5, enquanto que o maior valor encontrado (7.310  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) corresponde a um poço de 210 metros, situado na localidade de Santo Antonio do Meio em União do Oeste, SC. A distribuição dos valores de condutividade elétrica segue uma distribuição log-normal, conforme pode ser observado na Figura 30.

As classes encontradas na Análise Exploratória de Dados para a condutividade elétrica do SASG no Rio Grande do Sul e Santa Catarina estão relacionadas na Tabela 8. Como o valor encontrado na classe inferior é negativo, assume-se o menor valor medido, ou seja, 10,21  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Tabela 7. Estatística descritiva da CE medida em campo nos poços que captam o SASG.

Estatística	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Nº de Medidas	7.620
Mínimo	10,21
Máximo	7.310,00
Média	192,56
Mediana	167,00
Moda	202,00
Desvio padrão	169,99
Quartil inferior ( $Q_1$ )	117,35
Quartil superior ( $Q_3$ )	221,75
Distância entre quartis	104,40
Coefficiente de Variação	88,28

A condutividade elétrica apresenta valores que se concentram em torno dos valores centrais da distribuição, correspondentes à faixa de background, entre 117,35 e 378,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (classes C2 e C3). Os valores anômalos superiores (Classe C1) ocorrem em patamares acima de 378,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A faixa inferior (Classe C4) abaixo de 117,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$  corresponde a outra extremidade de valores fora da faixa central. A Figura 31 ilustra a distribuição espacial das classes de CE do SASG obtidas na AED na sua área de ocorrência no RS e SC.

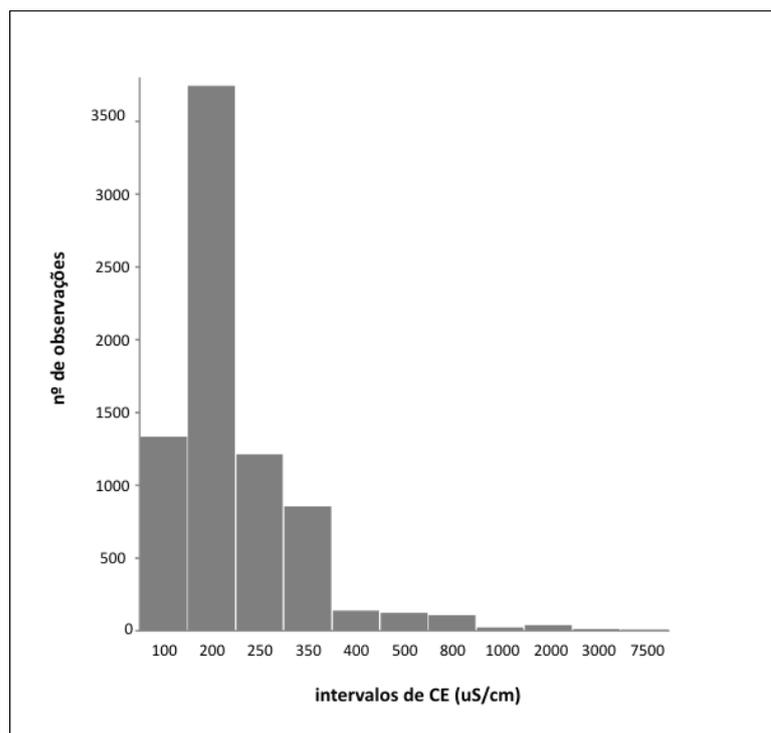


Figura 30. Histograma da CE medida *in loco* em 7.620 poços tubulares que captam o SASG nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Tabela 8. Classes de valores da AED para as variável e CE medida em campo nos poços que captam o SASG.

Classes		CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		
		intervalo	nº poços	(%)
C1	$\geq Q_3 + 1,5$ (IQR)	$\geq 378,35$	361	4,73
C2	$Q_3$ a $Q_3 + 1,5$ (IQR)	221,75 a 378,35	1.544	20,26
C3	$Q_1$ a $Q_3$	117,35 a 221,75	3.810	50,00
C4	$Q_1 - 1,5$ (IQR) a $Q_1$	10,21 a 117,35	1.905	25,00

A distribuição de poços relacionados à Classe C1 na área em estudo balizou a coleta de água para a análise físico-química e isotópica, com a finalidade de se investigar a origem e relação dessas águas. As classes C2 e C3 abrigam as águas típicas do SASG e sua variação deve-se, provavelmente, aos diversos tempos de residência no aquífero. A classe C4 refere-se às águas mais jovens e que se infiltraram recentemente no aquífero pela recarga meteórica através do manto de alteração das rochas vulcânicas.

#### 9.4. ANÁLISE DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS

O objetivo da análise de lineamentos morfoestruturais é integrar o padrão estrutural regional da área com os resultados derivados da interpretação hidrogeoquímica e isotópica do SASG.

No Bacia do Paraná as falhas transcorrentes são as responsáveis pela geração da grande quantidade de estruturas representadas pelos lineamentos morfoestruturais. Segundo Zalán *et al.* (1986), as grandes falhas transcorrentes afetam as rochas paleozoicas e mesozoicas da Bacia, com "estruturas-em-flor" sendo as mais características. Esses grandes falhamentos geram zonas cisalhadas profundas e relativamente espessas, muito suscetíveis ao intemperismo. Lineamentos tectônicos com comprimentos entre poucos quilômetros e centenas de quilômetros são muito frequentes nas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral e podem ser facilmente visualizados em imagens de sensores remotos. A diferenciação e classificação destas feições geradas em diversos eventos é uma tarefa difícil que requer muito conhecimento e um detalhado trabalho de geologia estrutural em afloramentos, o que não é o objetivo dessa pesquisa. O lineamento morfoestrutural expressa as zonas de maior possibilidade de circulação de água no aquífero fraturado e é aqui tratado de modo atemporal.

O traçado dos lineamentos morfoestruturais na escala 1:500.000, de acordo com o princípio da não inferência (SCHUCK *et al.*, 1986), permitiu visualizar o padrão tectônico frágil da área e sua relação com os principais sistemas de falhas e lineamentos regionais da Bacia do Paraná (ASMUS, 1975; SOARES *et al.*, 1982; ZALÁN *et al.*, 1990; SOARES *et al.*, 2008; PHILIPP *et al.*, 2014).

Foram traçados 1.297 lineamentos morfoestruturais (Figura 32) que apresentam as principais direções preferenciais: N-60 a 80-W; N-70 a 80-E e EW. Secundariamente destacam-se as direções N-45-W e N-30-E. O cálculo da densidade dos lineamentos morfoestruturais foi efetuado no módulo de densidade Kernel, que calcula a densidade de feições lineares a partir de um raio de busca (SILVERMAN, 1986). A densidade dos lineamentos morfoestruturais foi calculada após a devida filtragem nas seguintes direções principais: NS, NE, NW e EW. Os mapas de densidade de lineamentos representam as zonas mais fraturadas que podem indicar sistemas de falhas.

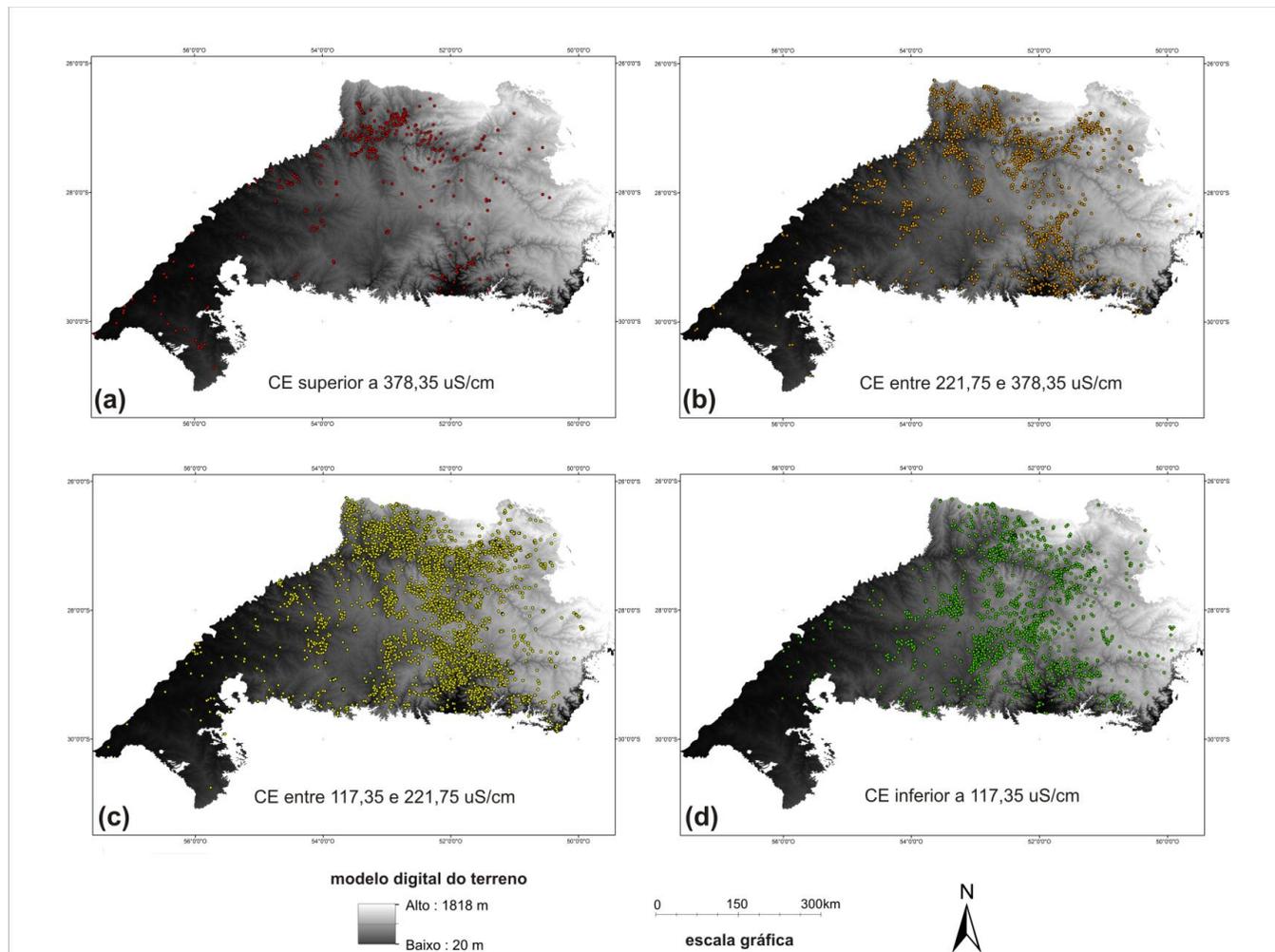


Figura 31. Poços tubulares que captam o SASG classificados conforme as classes de CE determinadas na AED: C1(a), C2(b), C3(c) e C4(d).

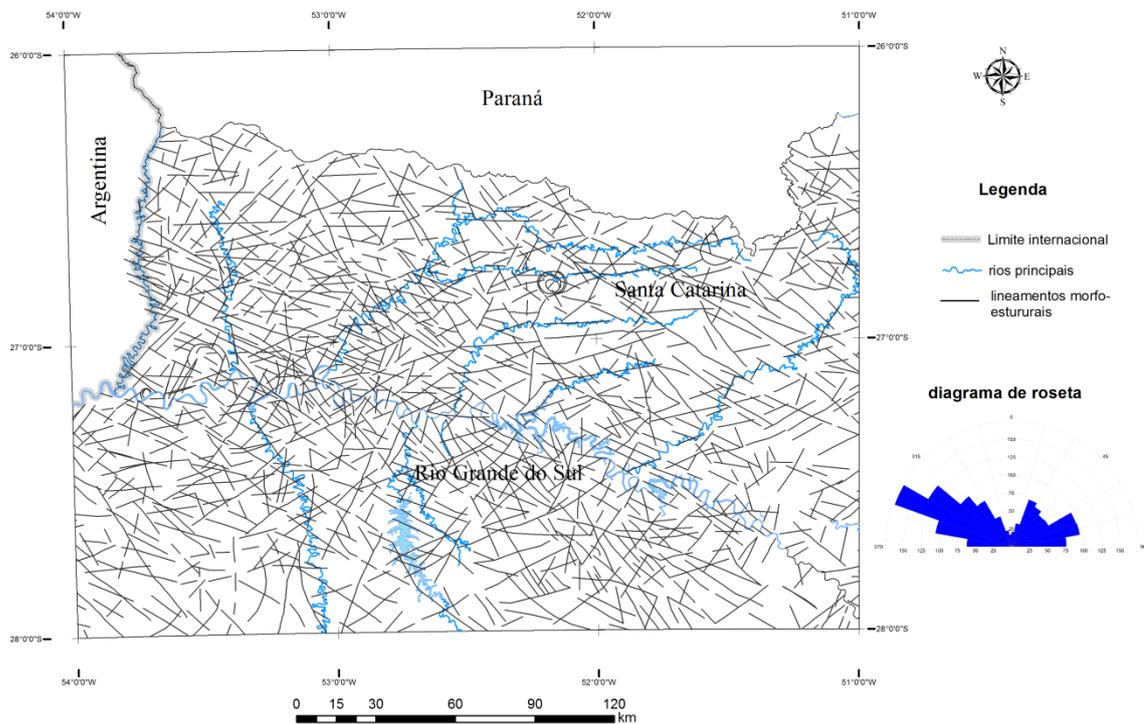


Figura 32. Lineamentos morfoestruturais traçados na escala 1:500.000.

A comparação entre a densidade de lineamentos e as estruturas regionais da Bacia do Paraná, representadas por falhas e grandes lineamentos, é apresentada na Figura 33. A direção EW está relacionada à influência do Lineamento do Rio Uruguai (ASMUS, 1975) e do Lineamento Taquara Verde (ZALÁN *et al.*, 1990). A direção NE apresenta evidente controle da Zona de Falha Lancinha Cubatão (ZALÁN *et al.*, 1990), enquanto que a direção NW está influenciada pelo Sistema de Falhas Torres Posadas (ZALÁN *et al.*, 1990; Philipp *et al.*, 2014) e dos lineamentos gravimétricos definidos por Soares *et al.* (2008).

Na tentativa de avaliar se há variações na salinidade em relação às direções dos lineamentos morfoestruturais, foram separados os poços que captam o SASG com anomalias de condutividade elétrica e que estão sobre ou próximos dos lineamentos. Nestes foi comparado o valor da condutividade elétrica do poço com a direção do lineamento morfoestrutural.

## Estruturas Regionais e Densidade de Lineamentos Morfoestruturais

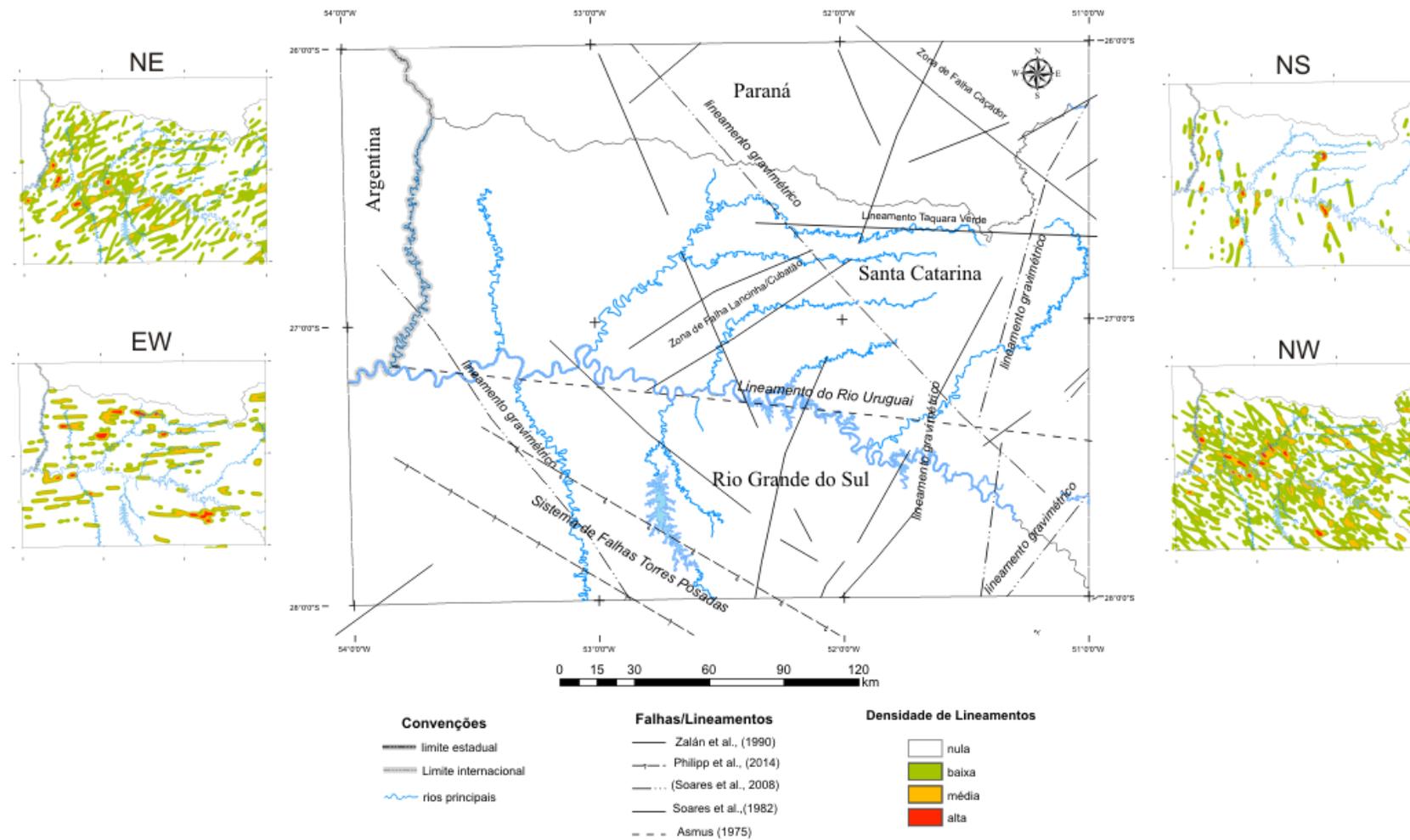


Figura 33. Comparação entre a densidade de lineamentos morfoestruturais e as estruturas regionais presentes na área de estudo.

A Figura 34, que contém a média da condutividade elétrica por direção dos lineamentos, mostra que as direções E-W, N-30-45-W, N-60-75-E, N-15-30-W, N-30-45-E e N-45-60-W são os que apresentam contêm poços com maior salinidade.

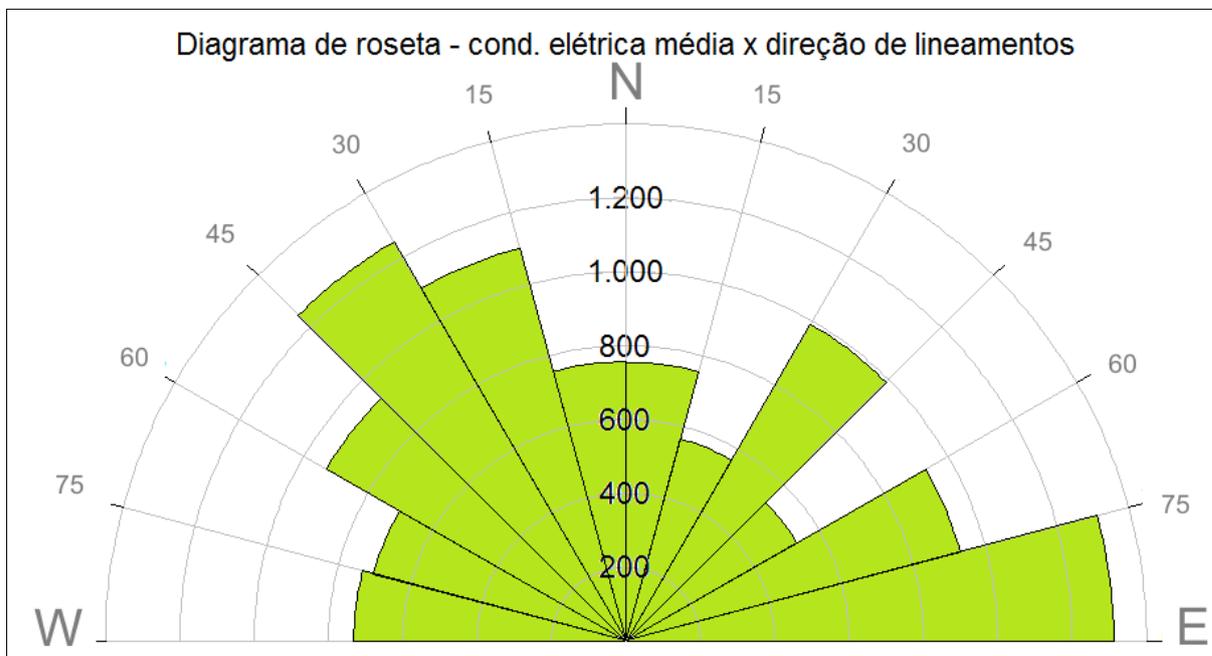


Figura 34. Condutividade elétrica média dos poços do SASG pertencentes à classe C1 e as direções dos lineamentos morfoestruturais.

Plotando-se os poços do SASG com valores anômalos de CE/Classe C1 ( $\leq 378,35 \mu\text{S/cm}$ ) nos mapas de densidade de lineamentos observa-se seu alinhamento nas direções NE e NW, respectivamente, nas Figuras 35 e 36. Na região de Ametista do Sul, Taquaruçu e Frederico Westphalen, no Rio Grande do Sul, a CE da água apresenta forte controle relacionado com a direção N-60-70-E (Figura 35). No extremo oeste de Santa Catarina, mais precisamente no trecho médio-inferior até a foz do rio Chapecó, em Palmitos, Caibi e Riqueza o controle é essencialmente N-60-W (Figura 36). As fontes termais que captam o SASG de São Carlos e Águas de Chapecó também estão controladas estruturalmente por esta direção. Mais ao norte, nos municípios de Quilombo, União do Oeste e Coronel Freitas o controle da salinidade nos poços está relacionado com a direção N-45-W.

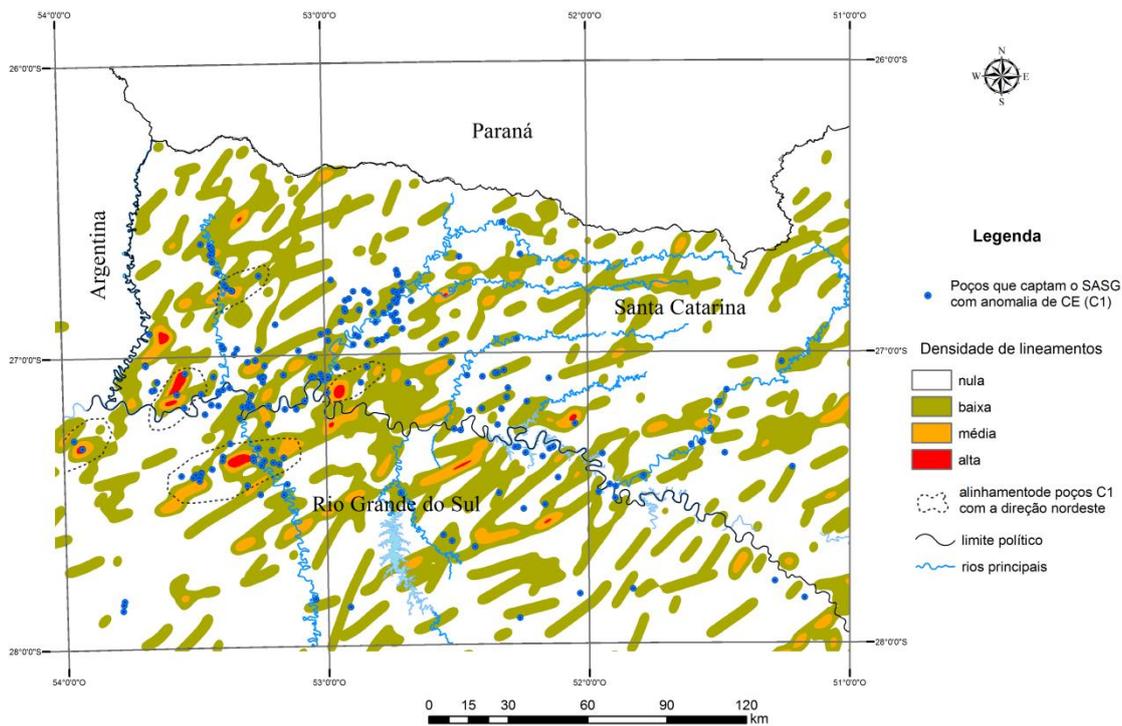


Figura 35. Mapa de densidade de lineamentos de direção NE e poços da classe C1 de CE( $\leq 378,35 \mu\text{S/cm}$ ).

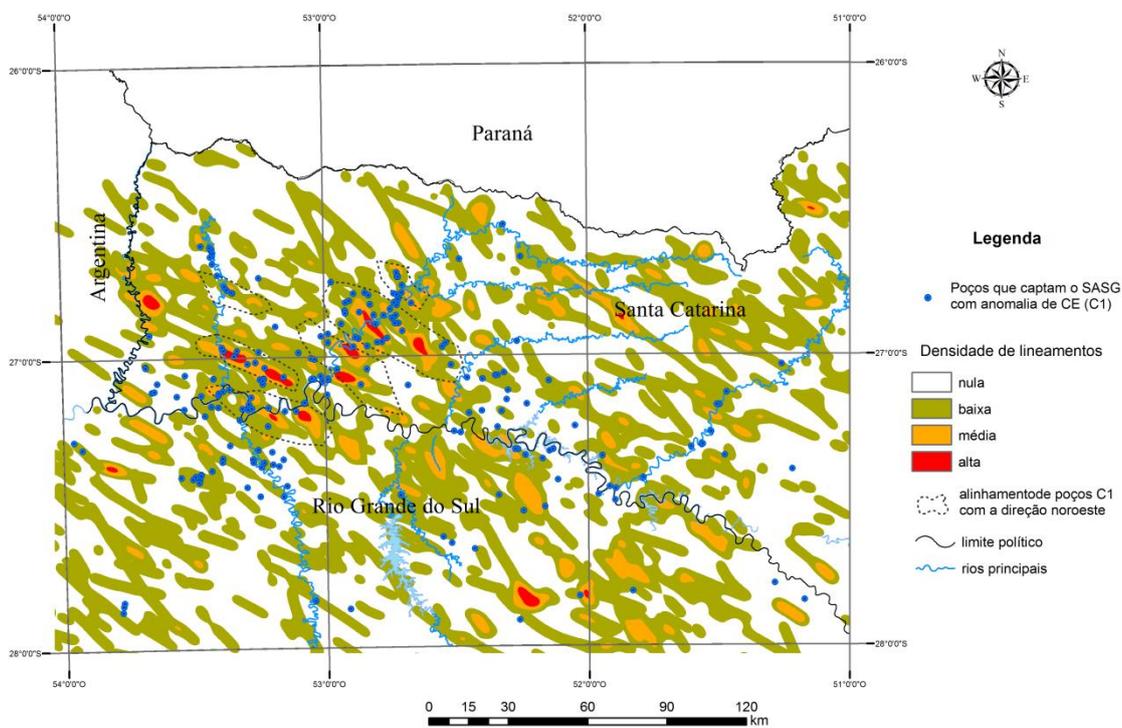


Figura 36. Mapa de densidade de lineamentos de direção NW e poços da classe C1 de CE( $\leq 378,35 \mu\text{S/cm}$ ).

## 9.5. SUPERFÍCIE LIMITE DE ARTESIANISMO DO SAG E SUAS IMPLICAÇÕES NO SASG

Para se determinar a superfície limite do artesianismo do SAG na área de estudo e com isso avaliar sua distribuição e interferência no SASG foram utilizadas rotinas de operação entre mapas por meio de geoprocessamento. O cruzamento do modelo digital do terreno e da superfície potenciométrica do SAG foi obtido através da seguinte operação:

$$LA = MDE - POT \quad (2)$$

onde LA é o limite do artesianismo; MDE é o modelo digital do terreno e POT é a superfície potenciométrica do SAG de acordo com LEBAC (2008), *rasterizada* com pixel de 90 x90 m. O resultado foi um mapa binário no qual a cor cinza claro corresponde às áreas onde a superfície do terreno está acima da superfície potenciométrica do SAG, enquanto que a cor cinza escuro refere-se às áreas onde a superfície potenciométrica do SAG está acima da superfície do terreno e pode ocorrer surgência (Figura 37). Observa-se que as áreas com potencial artesianismo estão localizadas junto aos vales dos principais rios da região.

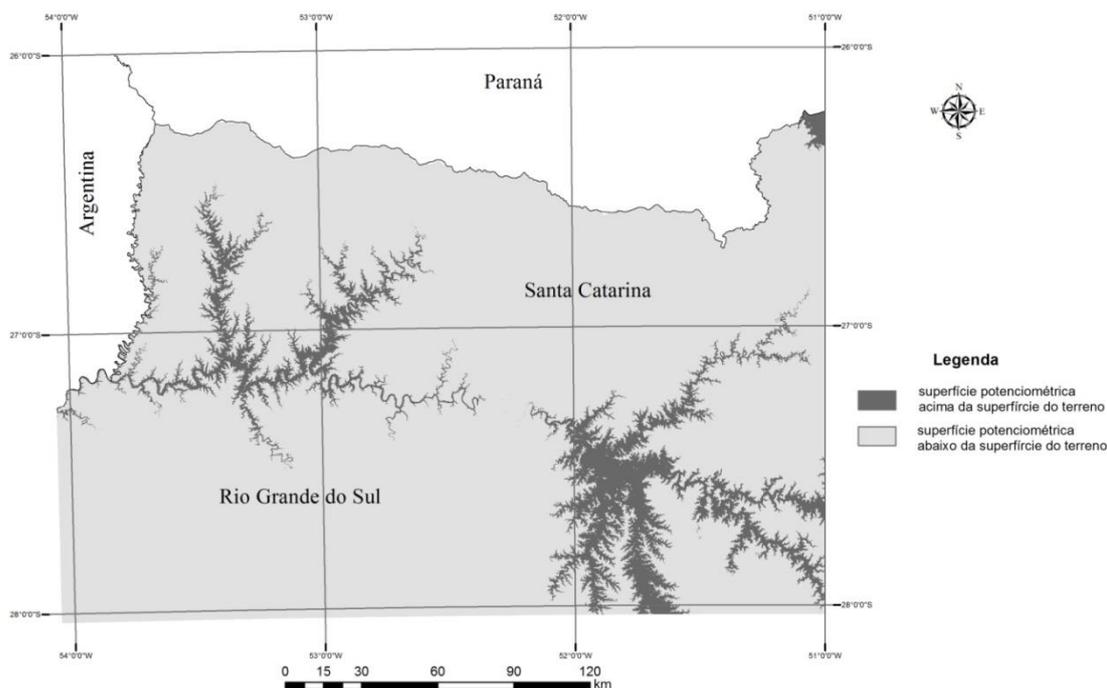


Figura 37. Áreas com potencial artesianismo do SAG derivadas do cruzamento entre a superfície potenciométrica do SAG (LEBAC, 2008) e o modelo digital do terreno.

Dados de profundidade dos poços do SASG com anomalias de CE foram utilizados para definir, se os mesmos, interceptam ou não a profundidade da superfície potenciométrica do SAG na área de estudo. Inicialmente foi feita a subtração da profundidade dos poços pela sua cota, resultando na cota da profundidade dos poços. A *shape* da cota da profundidade dos poços foi subtraída do *grid* da superfície potenciométrica, calculada anteriormente. O resultado positivo para o cálculo mostra que a profundidade do poço é maior que a profundidade da superfície potenciométrica do SAG, ou seja, o poço intercepta a mesma. Já um valor negativo para o cálculo mostra que a profundidade da superfície potenciométrica está abaixo da profundidade do poço, e este não intercepta a mesma.

Os poços que interceptam a superfície potenciométrica do SAG estão sob influência da recarga ascendente e os que não a atingem apresentam recarga preferencialmente a partir da superfície (Figura 38). Observando-se a distribuição destes poços, fica evidente o controle estrutural com os poços anômalos do SASG alinhados segundo a direção NE, EW e N-NW.

Tais resultados serviram de subsídio para a escolha dos poços a serem amostrados para a análise físico-química e isotópica no SASG.

## 9.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE POÇOS DO SAG E DO SASG COM CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ANÔMALA

### 9.6.1. Considerações Iniciais

A análise estatística multivariada, realizada nos resultados analíticos (Anexo III) dos poços amostrados, busca reduzir o número de variáveis para a compreensão dos fenômenos envolvidos e a separação de grupos hidrogeoquímicos semelhantes.

Para tanto foram analisados quimicamente 58 poços (Figura 39), sendo 19 que captam o SAG confinado e 39 o SASG com condutividades elétricas superiores a 378,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (valores anômalos). O poço S-236-BR-SJ, da Termas São João em São João do Oeste (SC), capta somente 8 metros de arenitos eólicos da Formação Botucatu e a maior parte da água refere-se à contribuição dos arenitos da Formação Rio do Rasto (Pré-SAG). Apesar deste fato, considerou-se na análise multivariada que o referido poço faz parte da população do SAG, para verificar se este se destaca dos demais e/ou agrupa-se com outro poço semelhante.

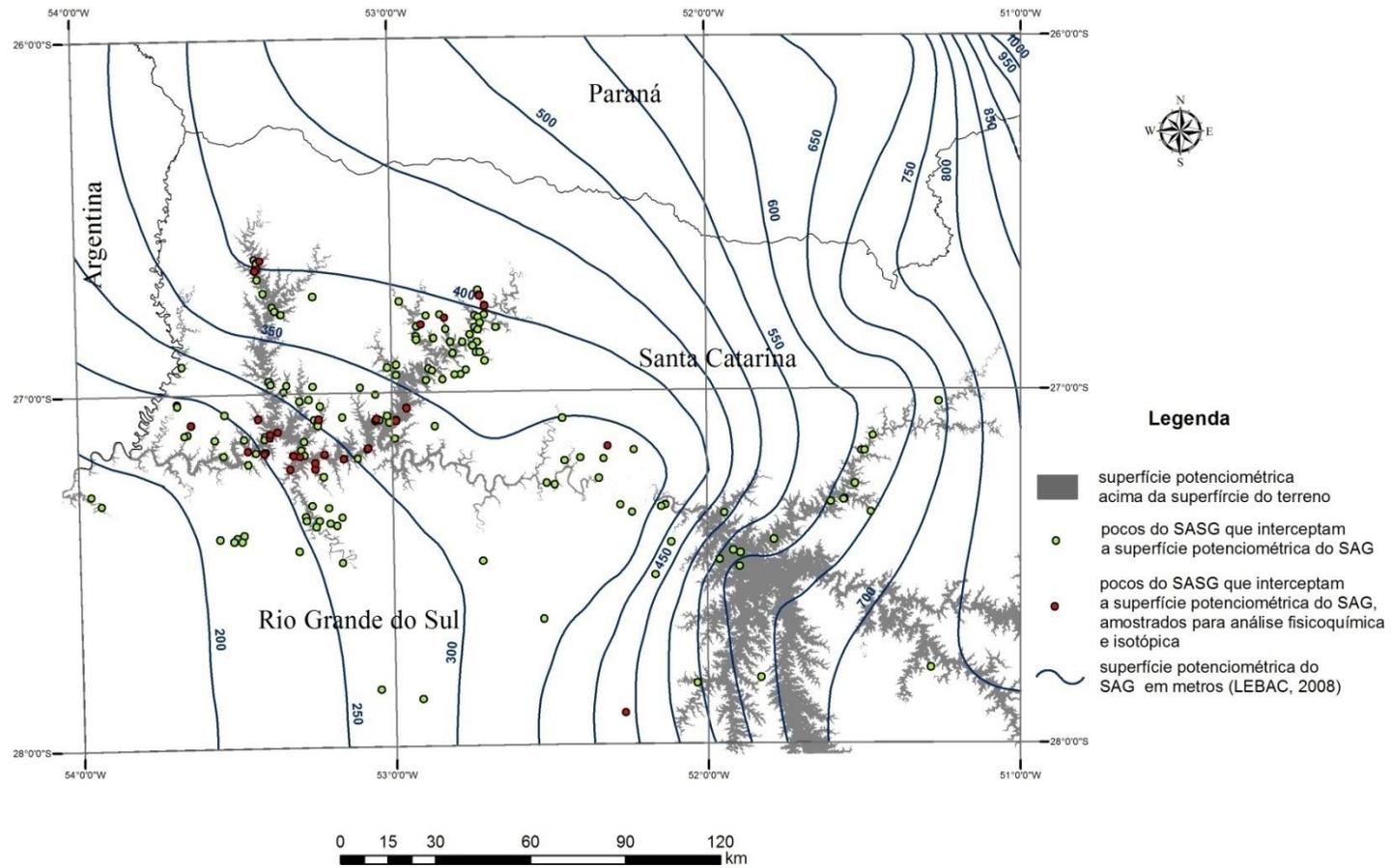


Figura 38. Poços com anomalia de CE no SASG que interceptam a superfície potenciométrica do SAG (modificada de LEBAC, 2008). Destes 167 poços, 39 foram amostrados para análise físico-química e isotópica.

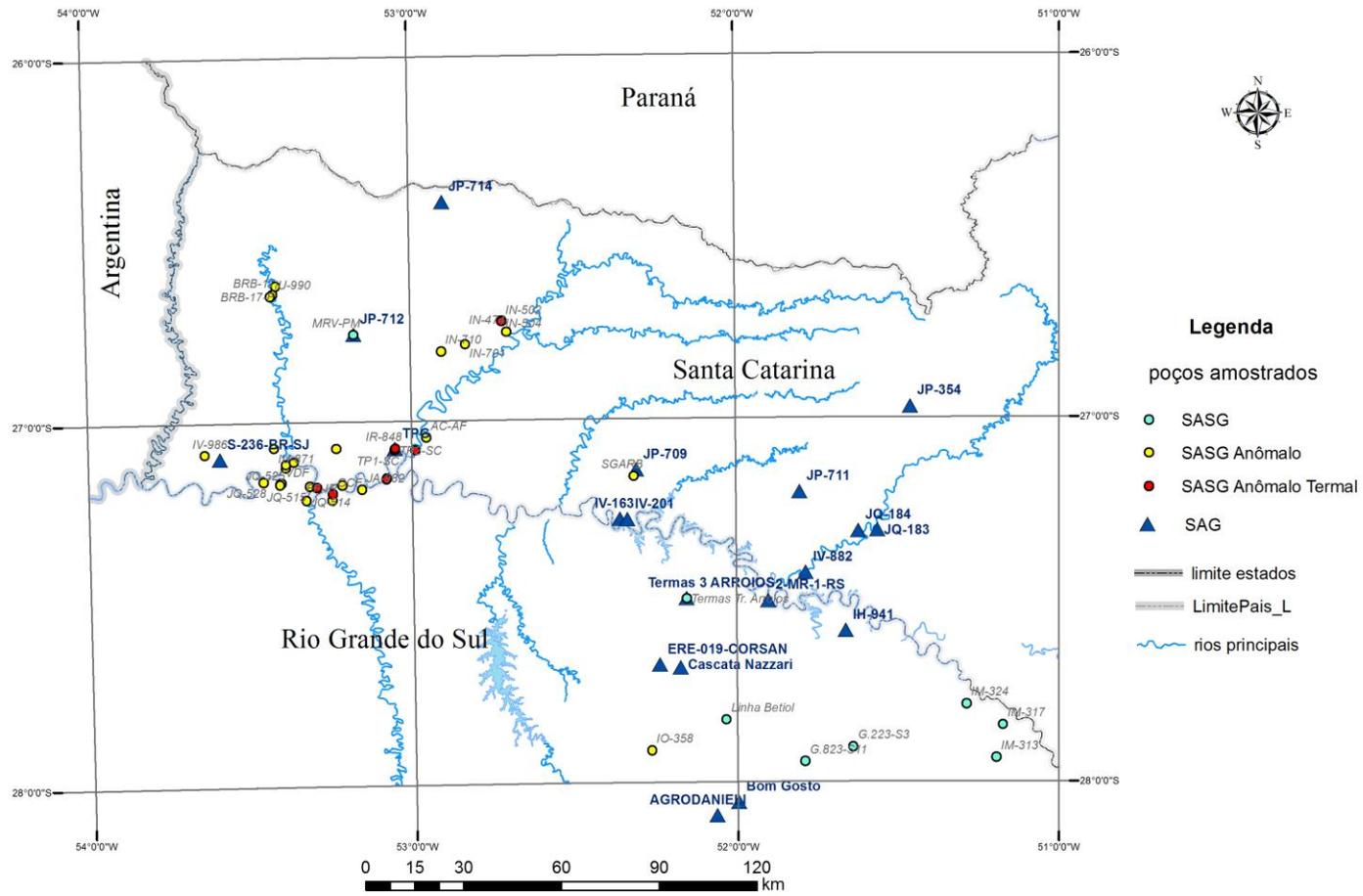


Figura 39. Poços amostrados para análise físico-química e isotópica na área de estudo.

A divisão entre poços termais e não termais obedeceu aos critérios do Código de Águas Minerais (BRASIL, 1945), que considera as águas passam a apresentar o fenômeno do termalismo se sua temperatura for maior ou igual que 25 °C. A análise multivariada foi realizada somente para os poços do SAG e do SASG com condutividades elétricas superiores a 378,35 µS/cm.

### 9.6.2. Variáveis utilizadas

Para a análise estatística multivariada foram escolhidas 19 variáveis a saber: temperatura da água, pH, alcalinidade total, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe total, Al<sup>3+</sup>, F<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, B<sup>3+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, P<sup>5+</sup>, Sr<sup>2+</sup> e os isótopos estáveis <sup>2</sup>H e <sup>18</sup>O. Estes parâmetros estão presentes em todas as análises realizadas na área de estudo.

A temperatura da água foi medida em graus celsius, os íons em mg/L e a composição isotópica <sup>2</sup>H e <sup>18</sup>O são expressos em per mil (‰), em comparação com a composição isotópica média das águas dos oceanos.

A distribuição espacial destes elementos nos poços amostrados está representada na Figura 40 até a Figura 58. Nestas figuras os poços estão classificados de acordo com o sistema aquífero envolvido, ou seja, poços que captam água no SASG e no SAG.

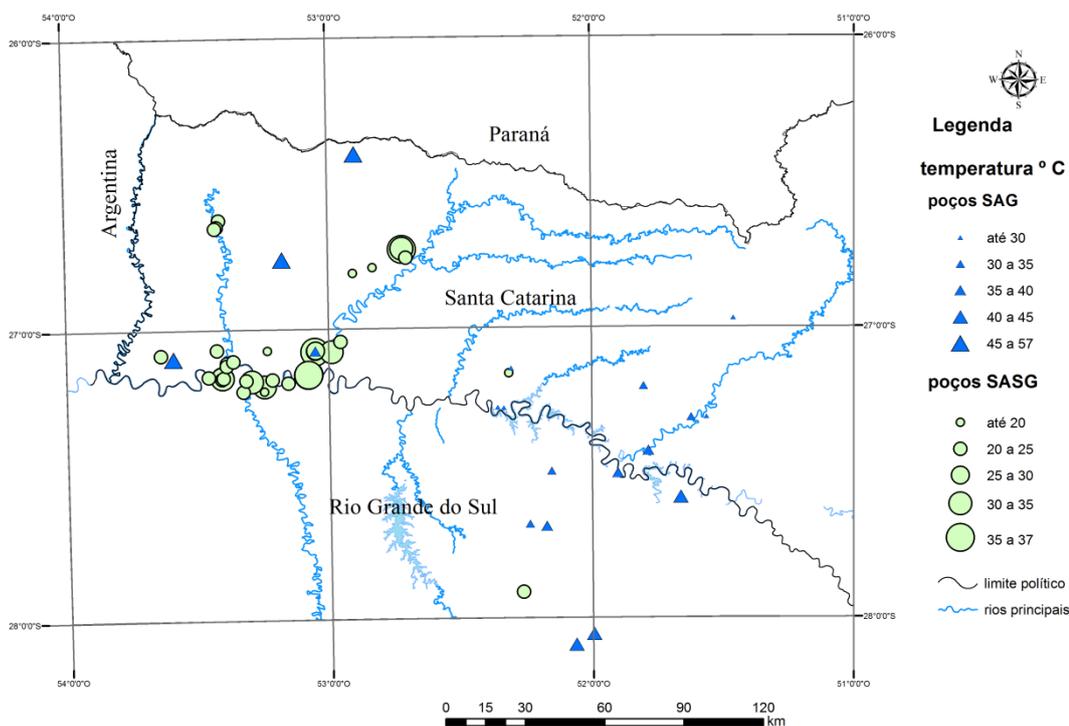


Figura 40. Distribuição espacial do parâmetro temperatura nos poços amostrados.

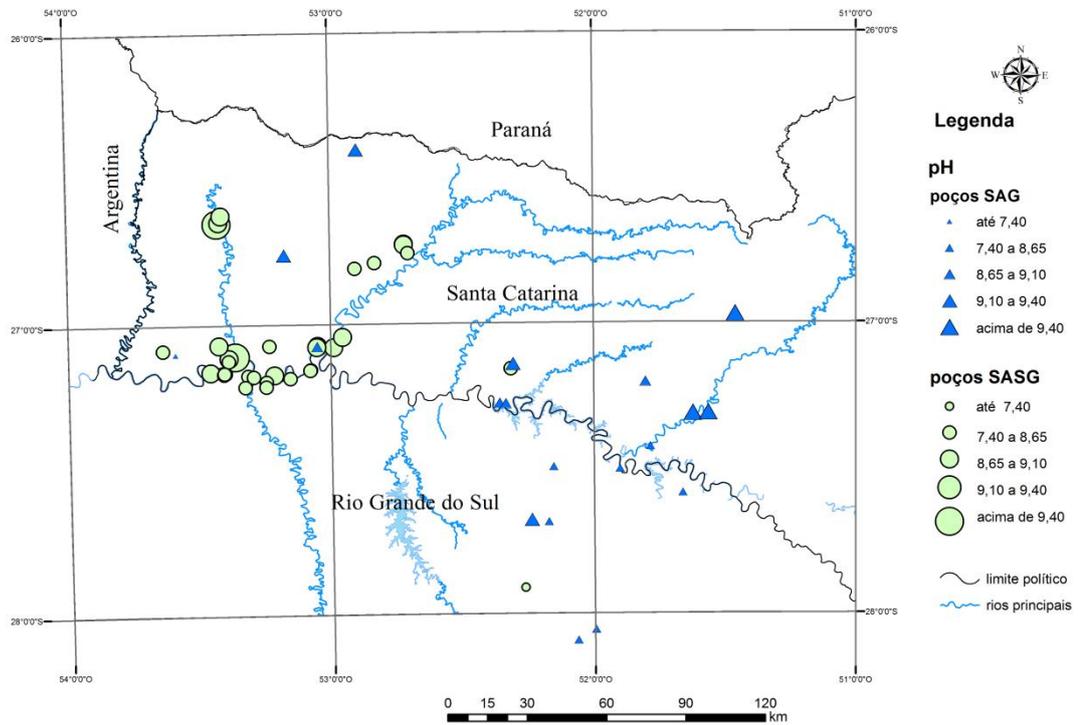


Figura 41. Distribuição espacial do parâmetro pH nos poços amostrados.

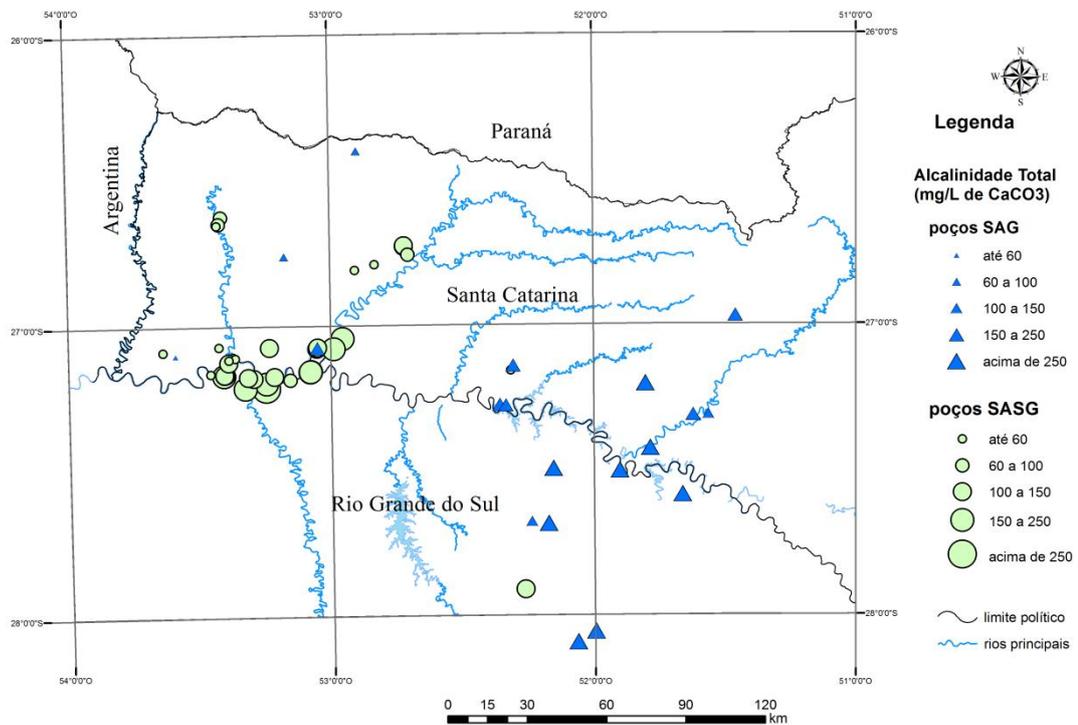


Figura 42. Distribuição espacial da Alcalinidade Total nos poços amostrados.

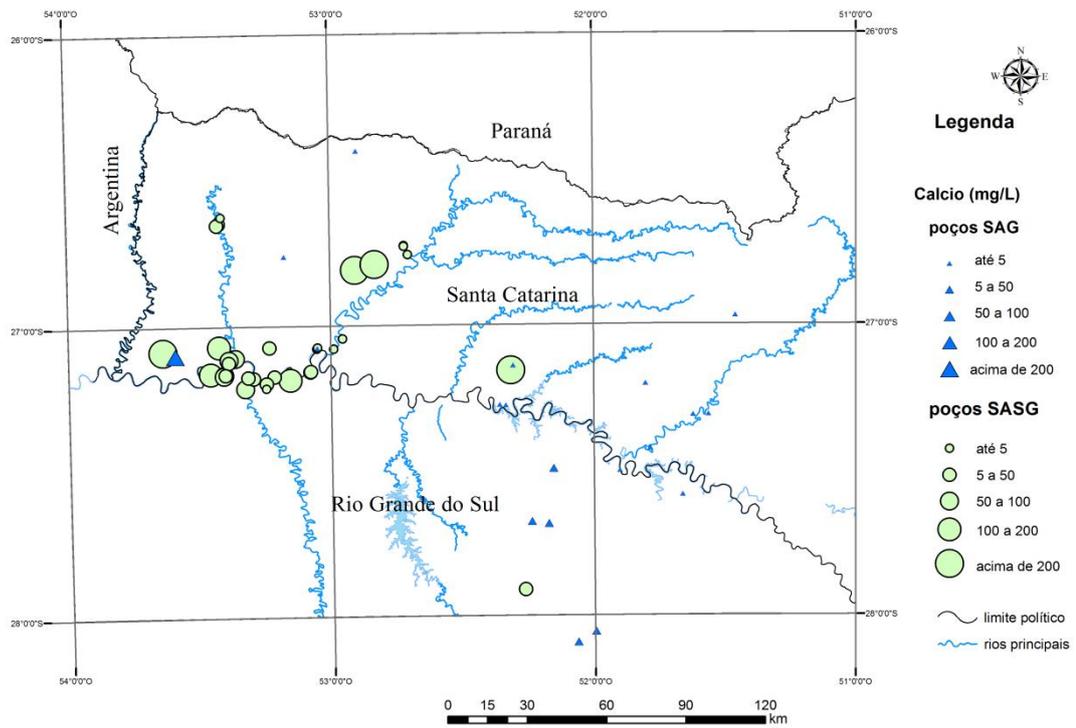


Figura 43. Distribuição espacial do  $\text{Ca}^{2+}$  nos poços amostrados.

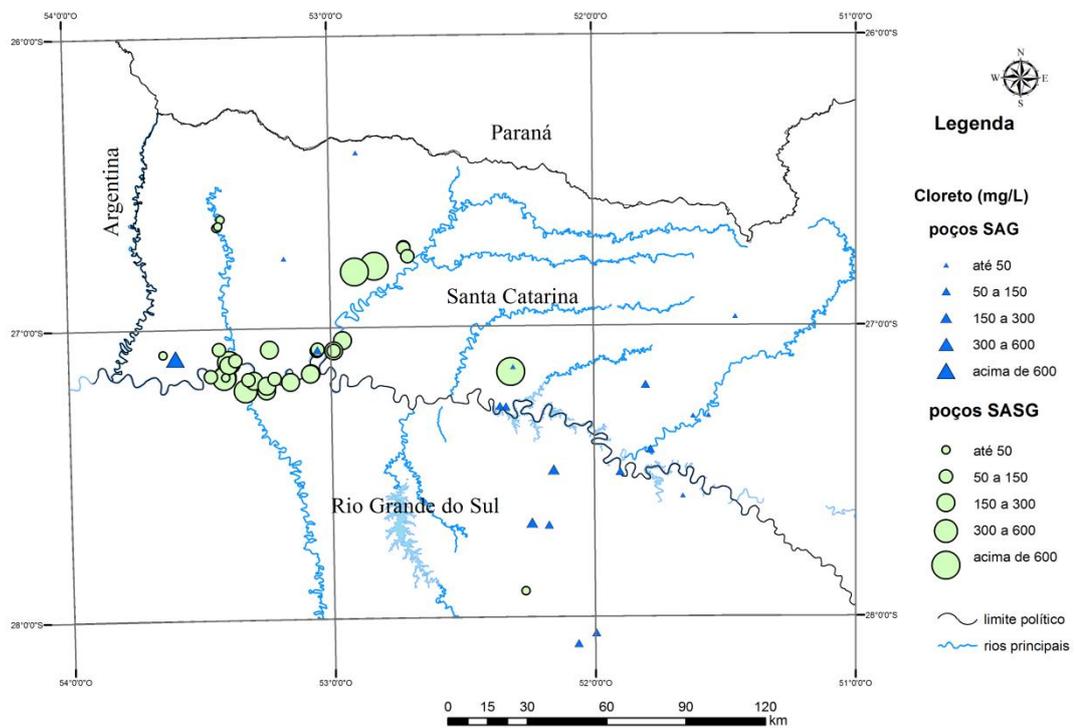


Figura 44. Distribuição espacial do  $\text{Cl}^-$  nos poços amostrados.

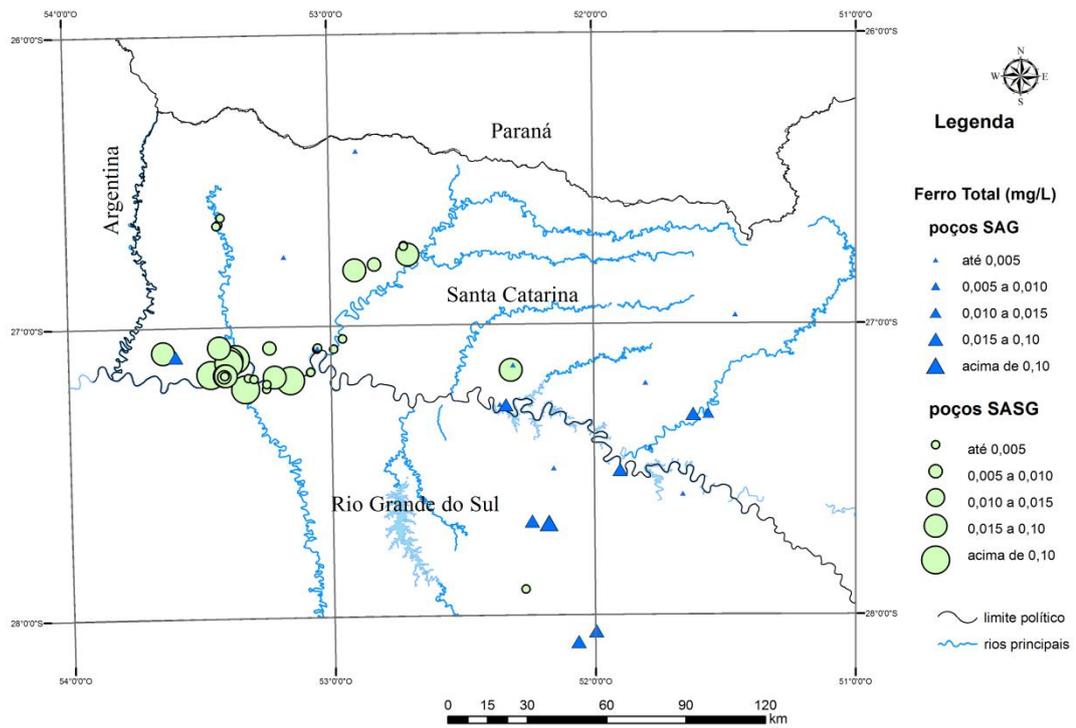


Figura 45. Distribuição espacial do Fe total nos poços amostrados.

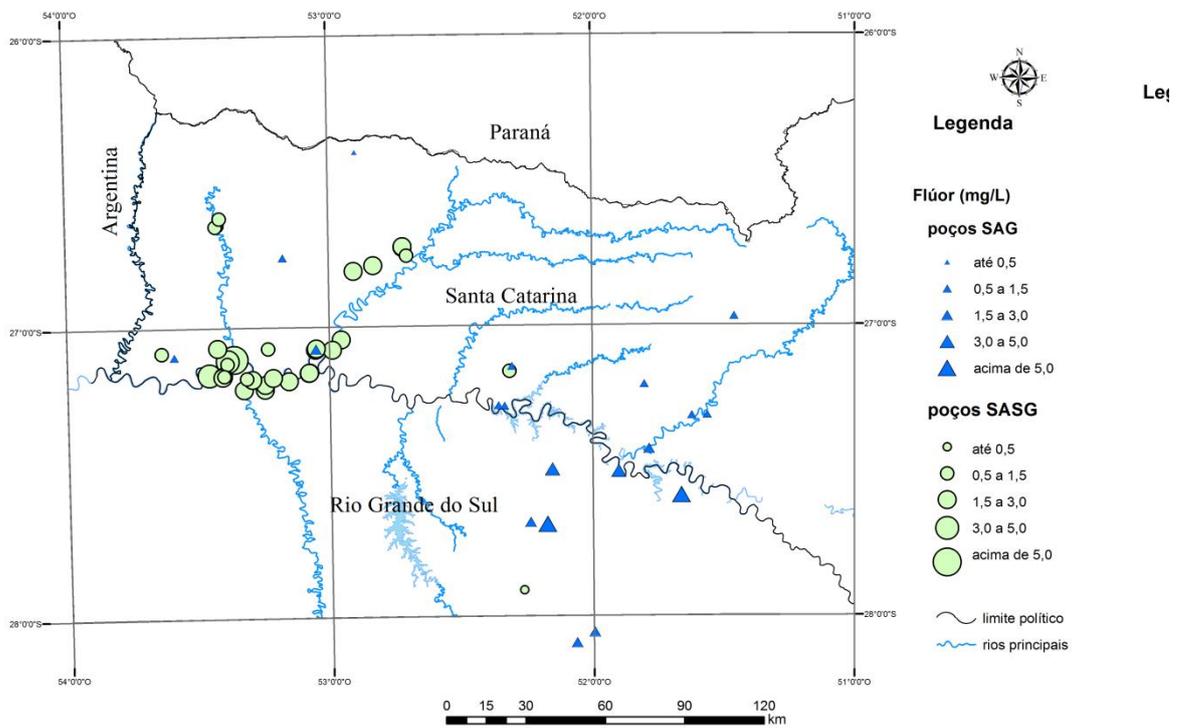


Figura 46. Distribuição espacial do F nos poços amostrados.

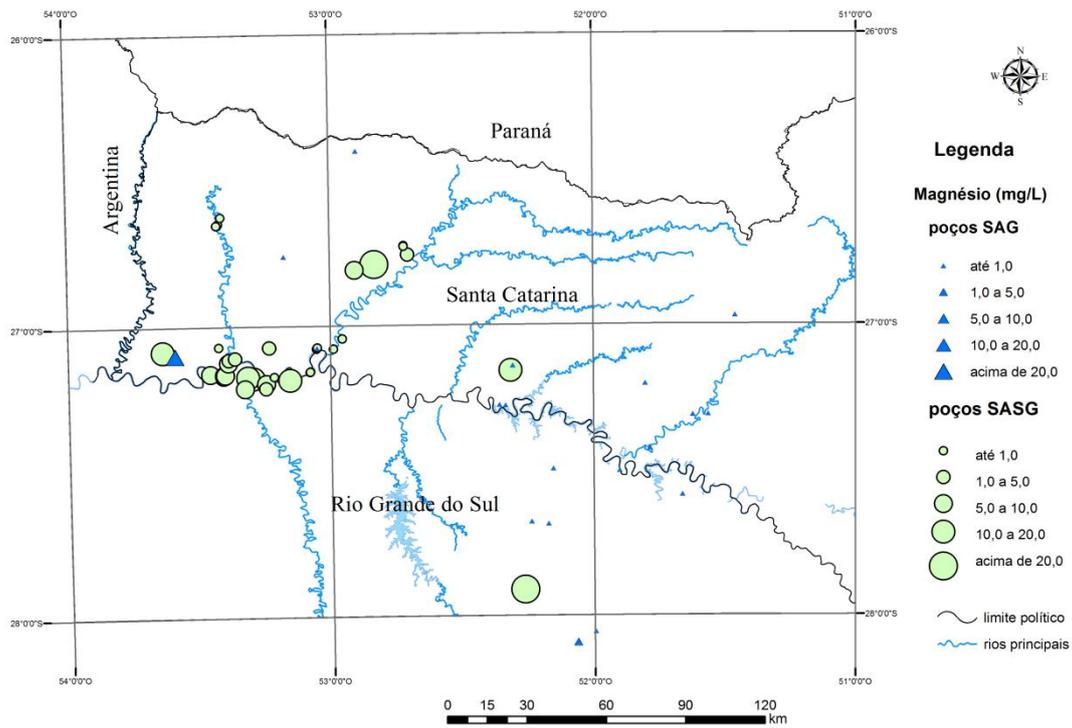


Figura 47. Distribuição espacial do  $Mg^{2+}$  nos poços amostrados.

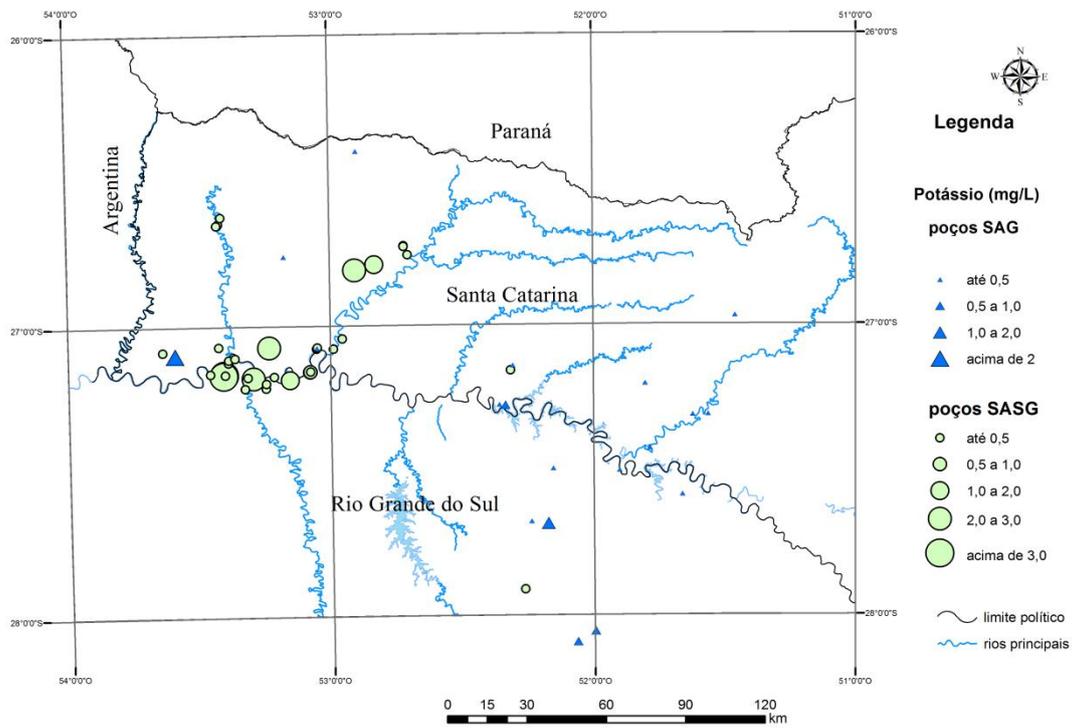


Figura 48. Distribuição espacial do  $K^+$  nos poços amostrados.

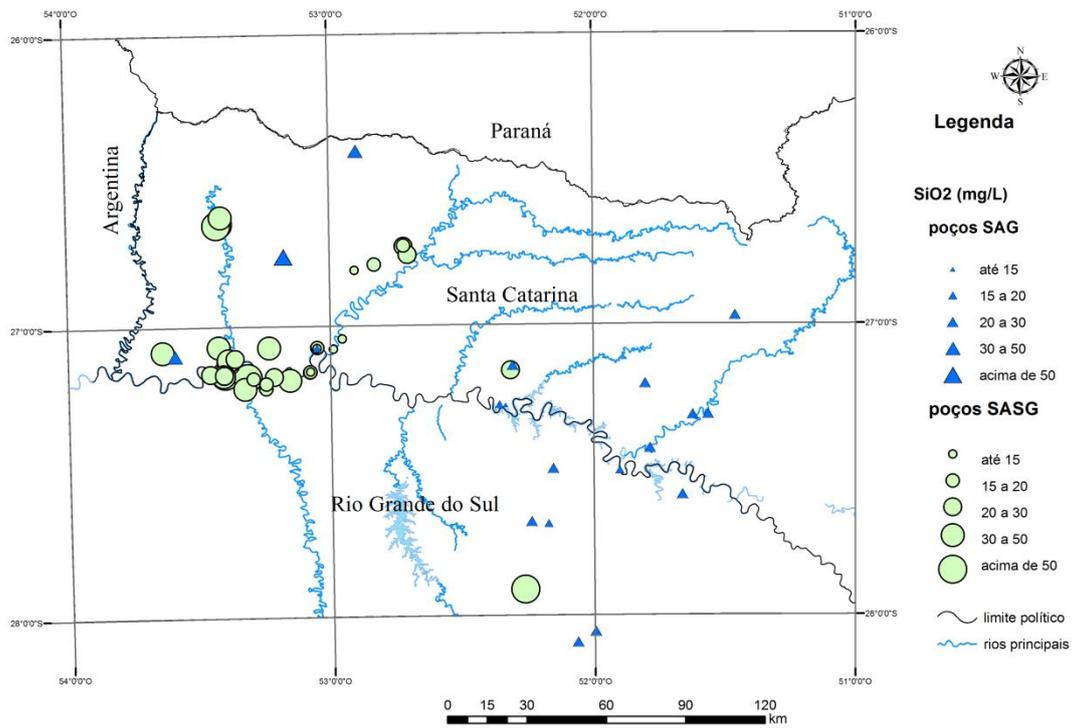


Figura 49. Distribuição espacial da SiO<sub>2</sub> nos poços amostrados.

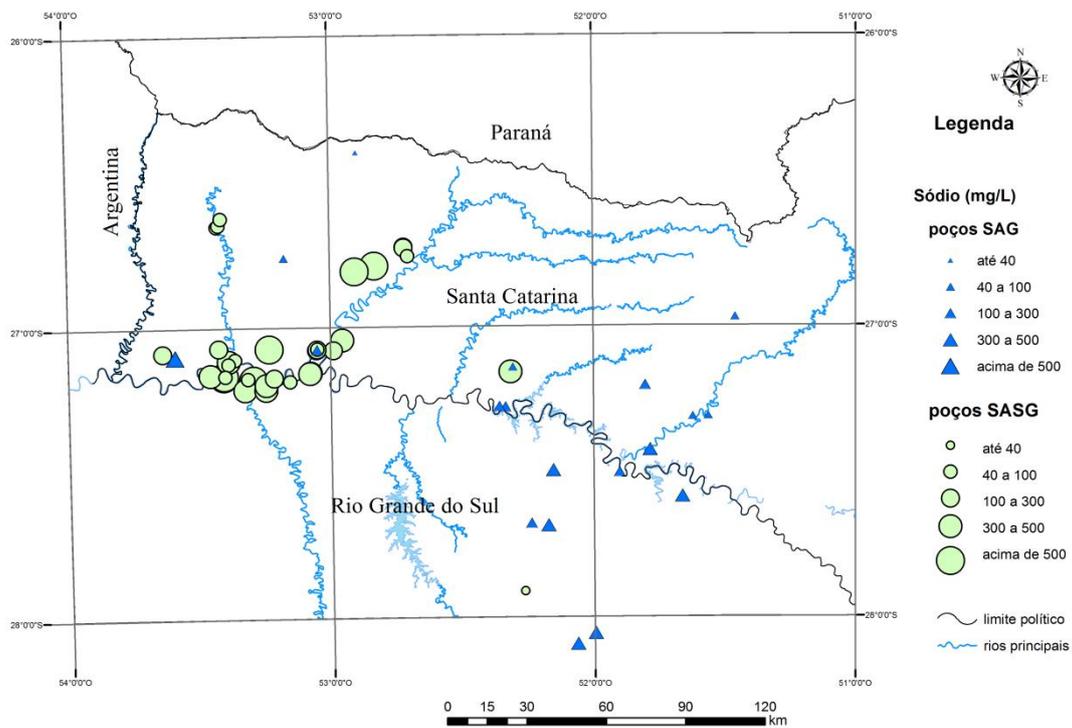


Figura 50. Distribuição espacial do Na<sup>+</sup> nos poços amostrados.

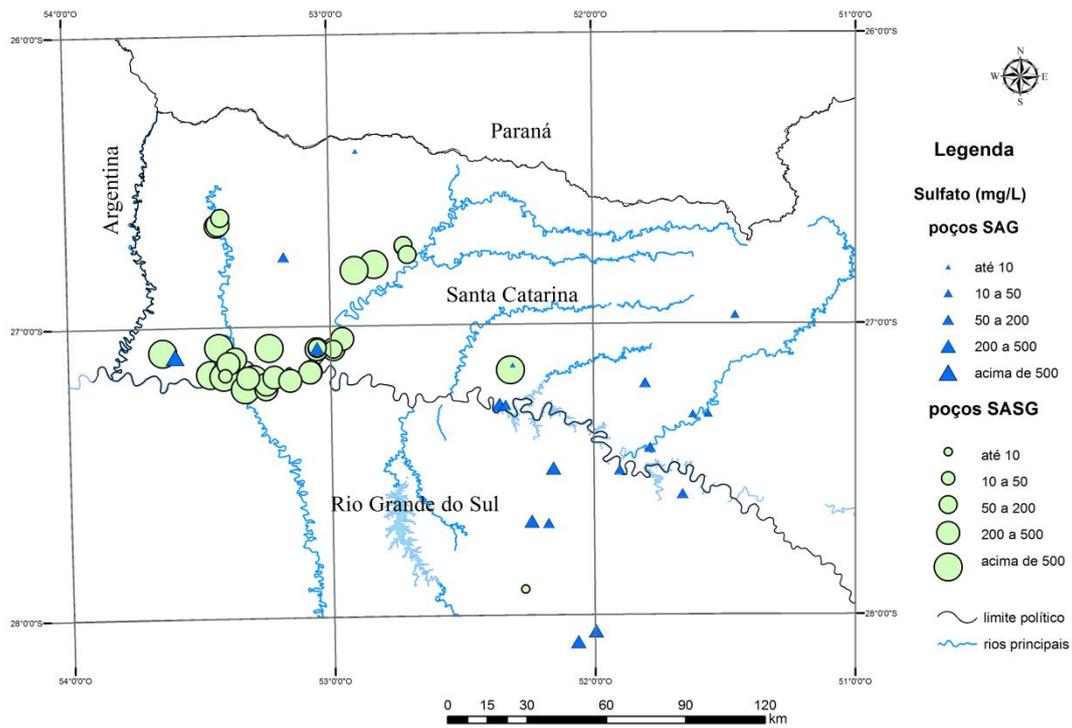


Figura 51. Distribuição espacial do  $\text{SO}_4^{2-}$  nos poços amostrados.

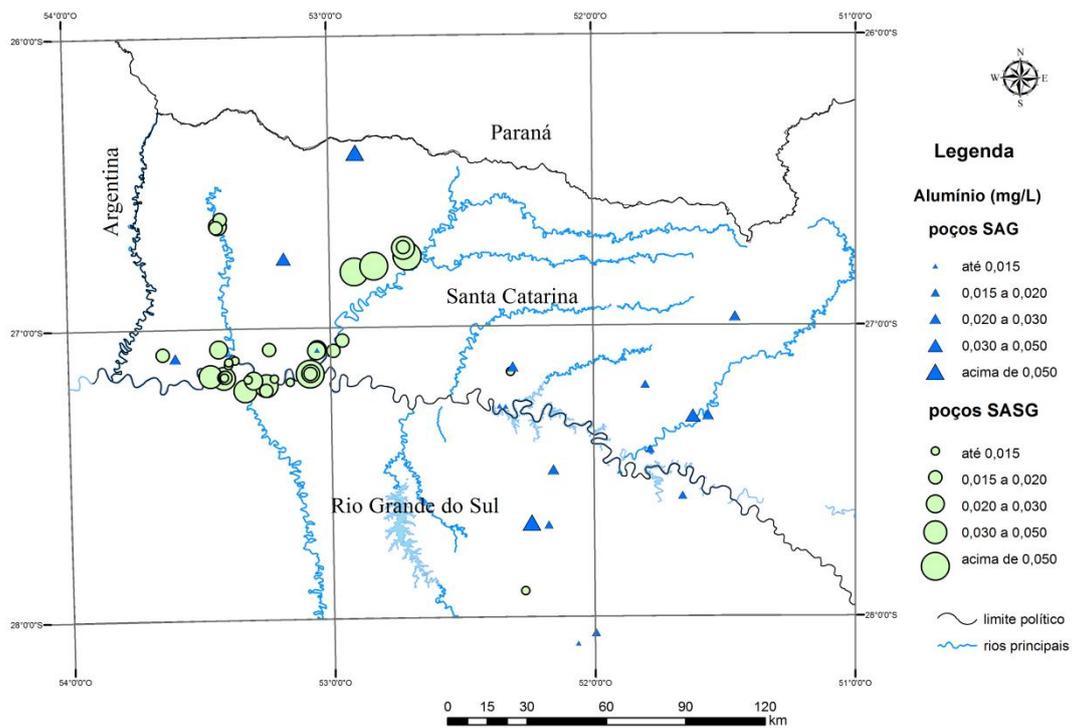


Figura 52. Distribuição espacial do  $\text{Al}^{3+}$  nos poços amostrados.

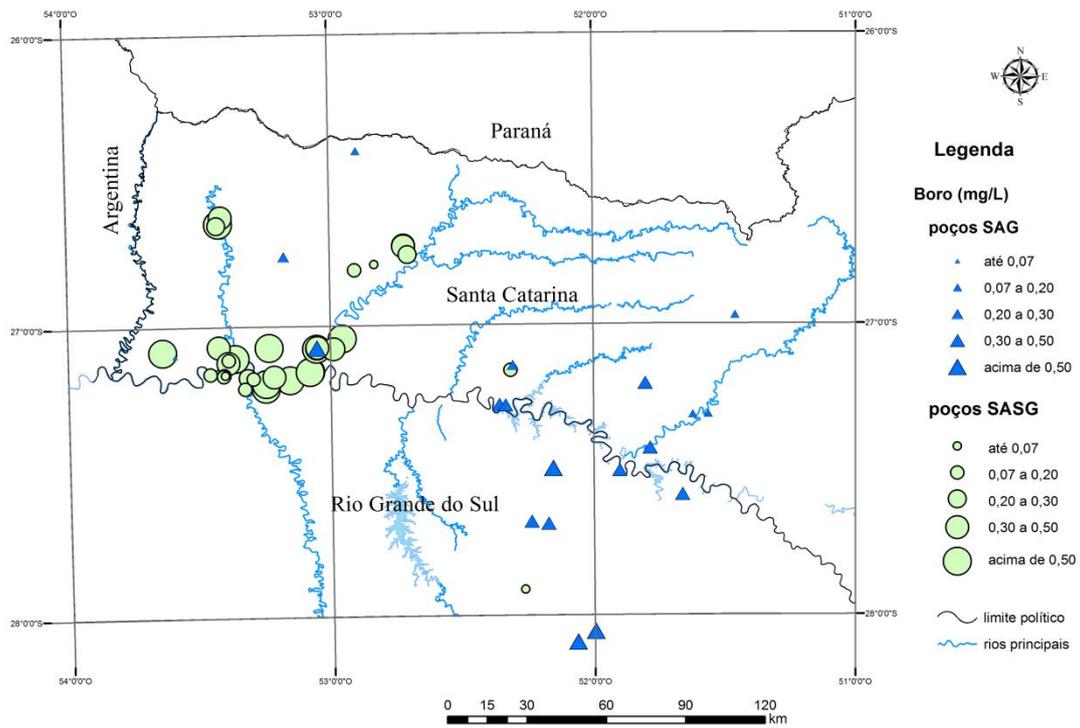


Figura 53. Distribuição espacial do B<sup>3+</sup> nos poços amostrados.

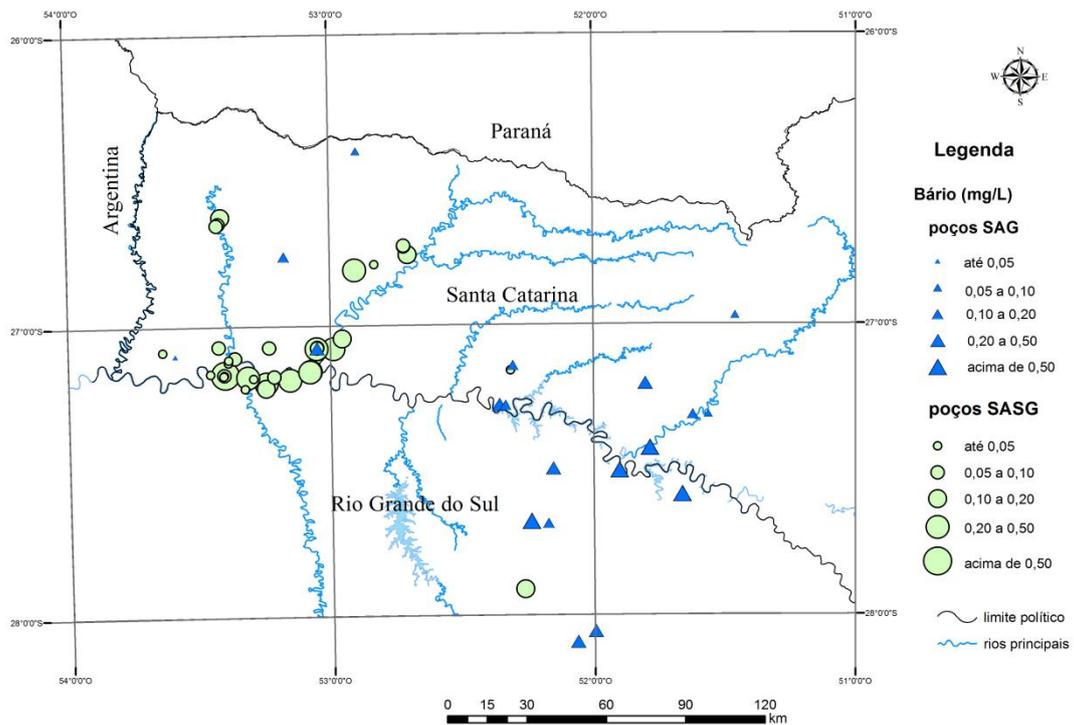


Figura 54. Distribuição espacial do Ba<sup>2+</sup> nos poços amostrados.

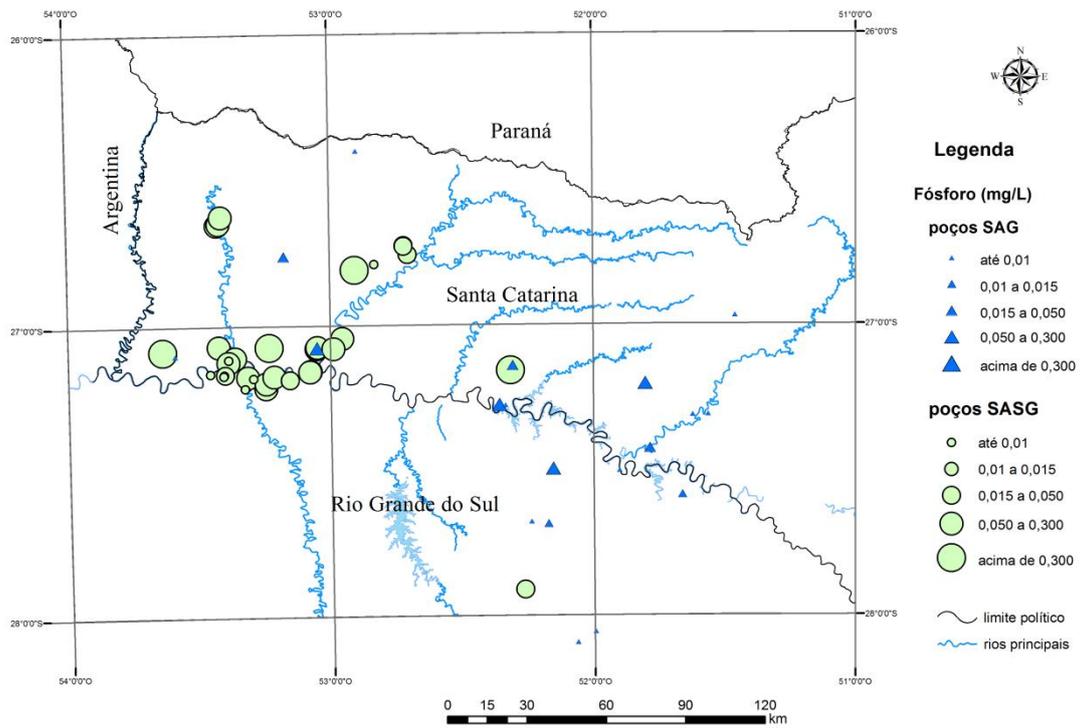


Figura 55. Distribuição espacial do  $P^{5+}$  nos poços amostrados.

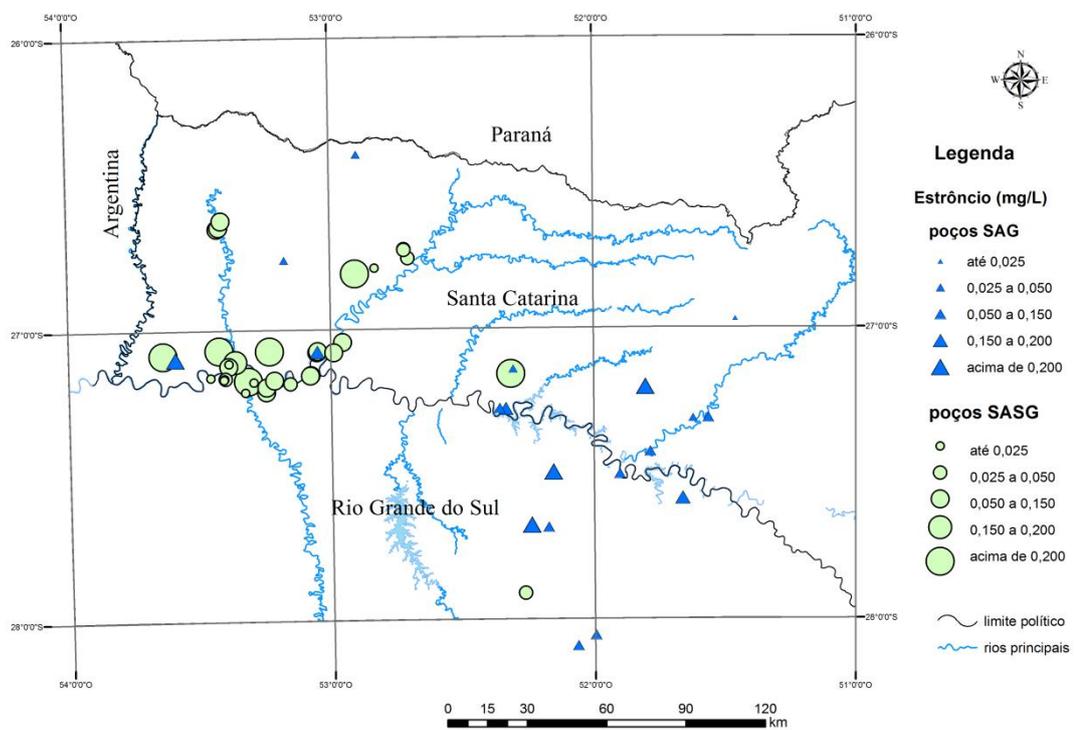


Figura 56. Distribuição espacial do  $Sr^{2+}$  nos poços amostrados.

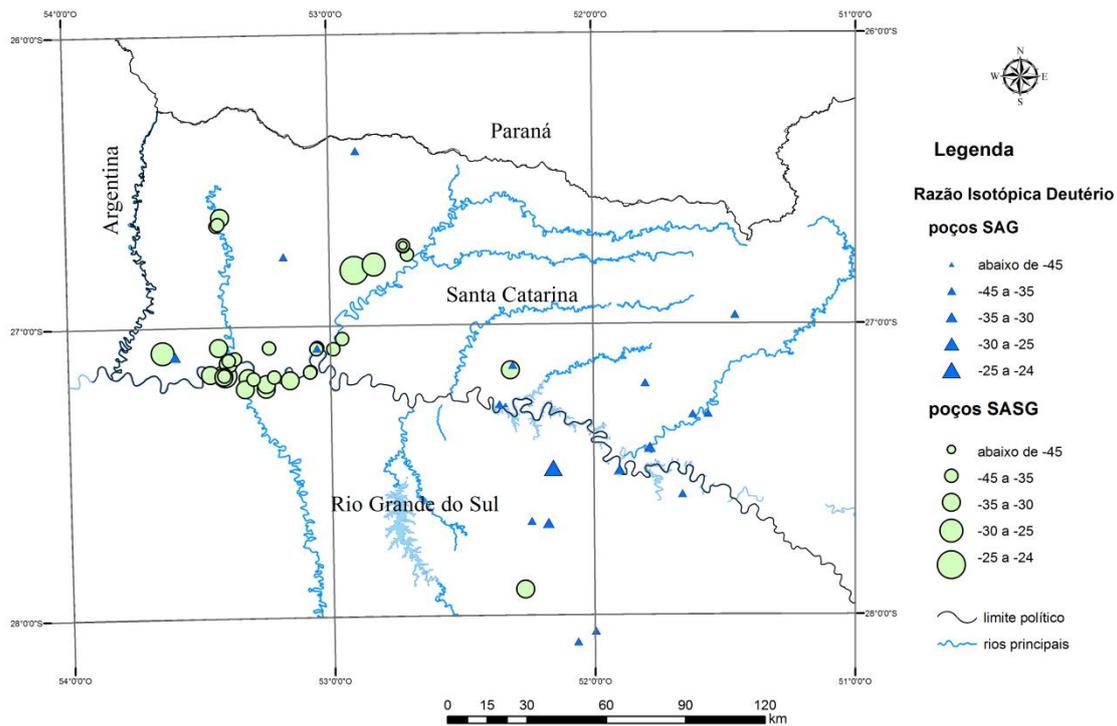


Figura 57. Distribuição espacial da razão isotópica de  $^2\text{H}$ .

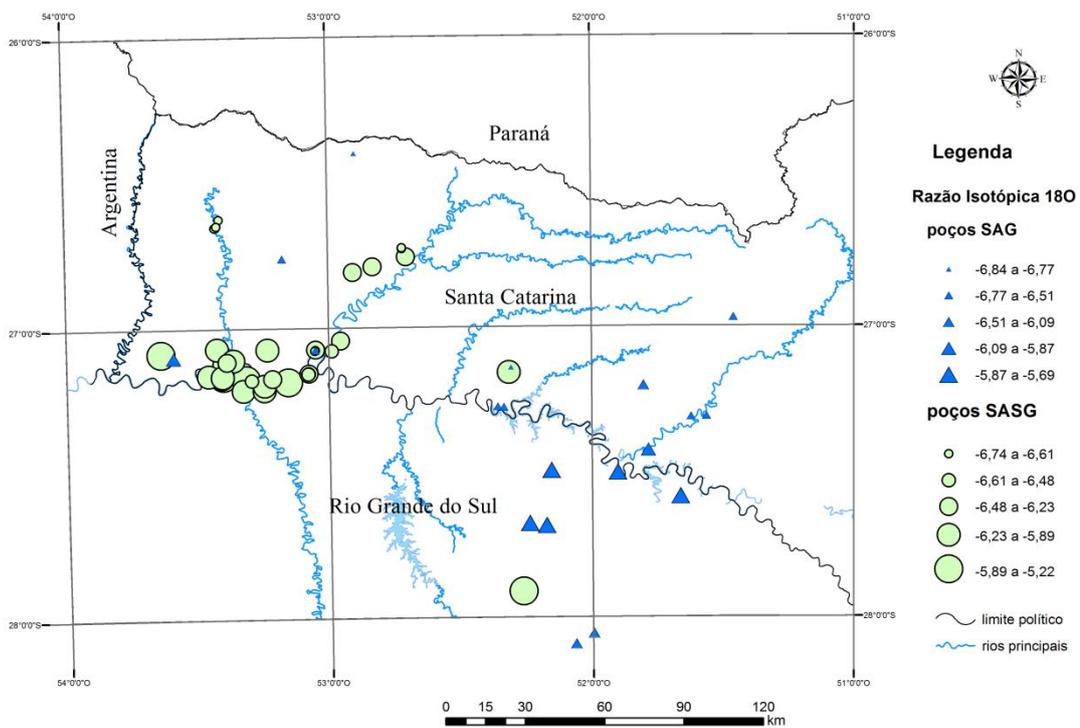


Figura 58. Distribuição espacial da razão isotópica de  $^{18}\text{O}$ .

Inicialmente, a análise multivariada foi realizada de modo separado para cada sistema aquífero da Bacia do Alto Rio Uruguai, ou seja, SAG e SASG foram tratados como duas populações diferentes. Após, para verificar a hipótese aventada, que a água com anomalia de condutividade elétrica provém de recarga ascendente, foi realizada a análise multivariada integrada utilizando os resultados analíticos do SAG e SASG como se fossem uma única população. Posteriormente os resultados foram confrontados para se conhecer qual o processo hidrogeoquímico regido. Como as variáveis são de diferentes unidades e significados, procedeu-se a padronização destas variáveis, antes de realização da análise multivariada. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam as características amostrais das variáveis utilizadas na análise estatística multivariada nos poços amostrados no SAG e SASG com anomalia de CE, respectivamente.

Tabela 9. Características amostrais das 19 amostras de água coletadas no SAG.

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Desvio padrão
temp °C	37,46	35,40	27,20	57,00	30,00	42,00	8,37
pH	8,85	9,03	7,40	9,58	8,33	9,36	0,59
Alcal. Tot.	262,98	181,20	58,40	596,00	146,50	381,20	167,37
Ca <sup>2+</sup>	18,11	3,20	0,80	273,80	2,40	7,20	61,97
Cl <sup>-</sup>	160,14	87,10	17,60	1544,00	26,20	138,60	339,36
Fe total	0,020	0,005	0,005	0,104	0,005	0,032	0,0246
F <sup>-</sup>	2,127	1,310	0,340	6,00	0,96	2,39	1,70
Mg <sup>2+</sup>	1,85	0,025	0,025	28,40	0,025	1,00	6,45
K <sup>+</sup>	0,95	0,005	0,005	13,00	0,005	1,00	2,97
SiO <sub>2</sub>	23,44	23,00	13,70	40,27	17,30	24,80	7,52
Na <sup>+</sup>	276,89	280,00	37,00	940,00	83,00	380,00	209,89
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	244,05	171,50	6,40	1470,80	49,00	286,00	327,35
Al <sup>3+</sup>	0,026	0,018	0,013	0,076	0,015	0,025	0,017
B <sup>3+</sup>	0,334	0,343	0,069	0,609	0,177	0,411	0,158
Ba <sup>2+</sup>	0,029	0,022	0,0003	0,091	0,0115	0,047	0,024
P <sup>5+</sup>	0,03	0,010	0,005	0,123	0,0050	0,047	0,036
Sr <sup>2+</sup>	0,17	0,127	0,024	0,567	0,0454	0,197	0,165
<sup>2</sup> H	-37,08	-38,53	-44,09	-23,97	-39,38	-34,34	4,278
<sup>18</sup> O	-6,2622	-6,2675	-6,8460	-5,694	-6,6558	-5,7715	0,42

Tabela 10. Características amostrais das 39 amostras de água coletadas no SASG com anomalia em relação a CE.

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Desvio padrão
temp °C	25,85	23,0	18,00	37,00	21,00	32,00	6,19
pH	8,48	8,63	6,98	9,80	8,01	8,88	0,57
Alcal. Tot.	114,24	118,80	8,90	256,60	69,30	152,50	62,30
Ca <sup>2+</sup>	82,20	8,70	3,20	757,90	4,80	80,20	167,78
Cl <sup>-</sup>	262,22	136,80	8,90	1441,40	87,90	259,00	339,85
Fe total	0,098	0,0050	0,005	0,936	0,005	0,06	0,24
F <sup>-</sup>	1,96	1,70	0,15	5,330	1,42	2,52	1,01
Mg <sup>2+</sup>	6,51	2,26	0,025	63,30	0,02	8,68	11,21
K <sup>+</sup>	0,75	0,005	0,005	5,00	0,005	1,00	1,46
SiO <sub>2</sub>	27,14	23,00	10,10	53,30	15,50	37,00	12,88
Na <sup>+</sup>	318,97	260,00	9,00	900,00	160,00	420,00	211,13
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	475,98	350,00	4,40	1658,30	197,80	706,90	378,72
Al <sup>3+</sup>	0,0325	0,0200	0,005	0,35	0,016	0,03	0,05
B <sup>3+</sup>	0,387	0,408	0,017	1,10	0,17	0,56	0,24
Ba <sup>2+</sup>	0,014	0,0069	0,0003	0,097	0,003	0,02	0,02
P <sup>5+</sup>	0,140	0,0730	0,010	1,36	0,03	0,11	0,25
Sr <sup>2+</sup>	0,237	0,140	0,039	1,90	0,09	0,26	0,33
<sup>2</sup> H	-35,36	-35,97	-39,54	-24,16	-38,35	-33,33	3,56
<sup>18</sup> O	-6,19	-6,27	-6,74	-5,22	-6,57	-5,96	0,41

As análises estatísticas multivariadas realizadas adotadas nesta pesquisa foram a análise de componentes principais (ACP) e a análise de agrupamento (*Cluster*). O principal objetivo da ACP é a redução da dimensionalidade para explicar a variabilidade dos dados, enquanto que na análise de agrupamento (*cluster analysis*) pretende-se reagrupar as amostras de água de acordo com a sua composição química em grupos hidrogeoquímicos distintos.

### 9.6.3. Análise de Componentes Principais SAG

Foram utilizados os resultados analíticos das 19 amostras de poços que captam o SAG em alto confinamento e 19 variáveis. A análise em componentes principais (ACP) tem o objetivo principal de reduzir a dimensionalidade dos dados. Mais precisamente, parte-se de

um conjunto com 19 variáveis correlacionadas (moderadamente) e pretende-se encontrar um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, as componentes principais. Estas são uma combinação linear das variáveis originais. Deste modo, um menor número destas variáveis poderá explicar uma percentagem significativa da variabilidade dos dados. Caso a explicação fosse total, ter-se-ia que usar as 19 componentes principais e o estudo seria desnecessário.

Em seguida, deve-se decidir o número de componentes a reter. Os autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais estão listados na Tabela 11 e pelo critério proposto por Kaiser em 1960, deve-se reter as componentes principais cujos autovalores sejam superiores a um. Nesta Tabela observa-se que os 5 primeiros autovalores são maiores do que um, portanto correspondem às 5 primeiras componentes principais retidas, que explicam 90,23 % da variância. Desta forma a redução da dimensionalidade é de 19 para 5.

Tabela 11. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SAG.

<b>Componentes</b>	<b>Autovalores</b>	<b>% de variância explicada</b>	<b>% de variância explicada acumulada</b>
1	7,465709	39,29320	39,2932
2	5,004001	26,33685	65,6301
3	1,971320	10,37537	76,0054
4	1,686622	8,87696	84,8824
5	1,016638	5,35072	90,2331
6	0,753380	3,96516	94,1983
7	0,531394	2,79681	96,9951
8	0,259375	1,36513	98,3602
9	0,118185	0,62203	98,9822
10	0,085990	0,45258	99,4348
11	0,054365	0,28613	99,7209
12	0,020952	0,11027	99,8312
13	0,018035	0,09492	99,9261
14	0,007685	0,04044	99,9666
15	0,004467	0,02351	99,9901
16	0,001585	0,00834	99,9984
17	0,000283	0,00149	99,9999
18	0,000016	0,00008	100,0000

Os *loadings* das componentes principais para cada uma das 19 variáveis estão relacionados na Tabela 12. Em cada variável selecionou-se o maior *loading*, em valor absoluto, para compreender qual ou quais as variáveis mais importantes na formação de cada uma das 5 primeiras componentes. Deste modo, para a primeira componente as variáveis que mais contribuíram para a sua formação foram: o pH, o cálcio, o cloreto, o magnésio, o potássio, o sódio e o sulfato. Para a segunda componente principal foram a alcalinidade total, o flúor, o boro e o isótopo  $^{18}\text{O}$ . Para a terceira componente somente o fósforo contribuiu para a formação da mesma. Na quarta componente o alumínio tem contribuição na sua formação. Para a quinta componente principal nenhum parâmetro teve contribuição importante.

Tabela 12. Matriz de *loadings* das componentes principais para cada variável do SAG.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
temp °C	-0,473220	-0,344036	-0,096872	-0,564327	0,460909
pH	<b>0,815460</b>	-0,447011	0,133374	-0,049134	-0,258120
Alcal. Tot.	0,032608	<b>0,880542</b>	-0,323509	-0,132007	0,212561
Ca <sup>2+</sup>	<b>-0,942202</b>	-0,284263	0,000787	0,098743	-0,056234
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,961010</b>	-0,194948	0,057151	0,114508	-0,084747
Fe total	-0,356363	0,338721	-0,666753	-0,039641	-0,158210
F <sup>-</sup>	-0,083846	<b>0,829172</b>	-0,376580	-0,226207	0,112957
Mg <sup>2+</sup>	<b>-0,942974</b>	-0,280626	-0,027303	0,103957	-0,065047
K <sup>+</sup>	<b>-0,949426</b>	-0,242889	-0,127527	0,127563	-0,039965
SiO <sub>2</sub>	-0,398095	-0,673625	0,092158	-0,459256	0,268960
Na <sup>+</sup>	<b>-0,931971</b>	0,322033	0,037877	0,085982	-0,003846
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>-0,952392</b>	-0,070814	0,042298	0,176950	0,016247
Al <sup>3+</sup>	0,090632	-0,555374	0,203736	<b>-0,735648</b>	-0,110325
B <sup>3+</sup>	0,118384	<b>0,753399</b>	0,304913	0,081439	0,138313
Ba <sup>2+</sup>	0,079205	0,659394	0,328103	-0,439255	-0,385350
P <sup>5+</sup>	0,061113	0,277426	<b>0,754350</b>	0,294846	0,382745
Sr <sup>2+</sup>	-0,684751	0,225725	0,471507	-0,122019	-0,438746
<sup>2</sup> H	-0,435862	0,494545	0,432881	-0,111405	0,193995
<sup>18</sup> O	-0,463265	<b>0,778344</b>	0,015606	-0,375533	-0,096899

A Figura 59 ilustra a representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes, que explicam 65,63% da variância dos dados. Nesta figura, são visualizadas quais as variáveis que mais contribuíram para as duas primeiras componentes principais, enquanto que a temperatura, o ferro, o fósforo e o isótopo  $^2\text{H}$  não contribuem para as mesmas.

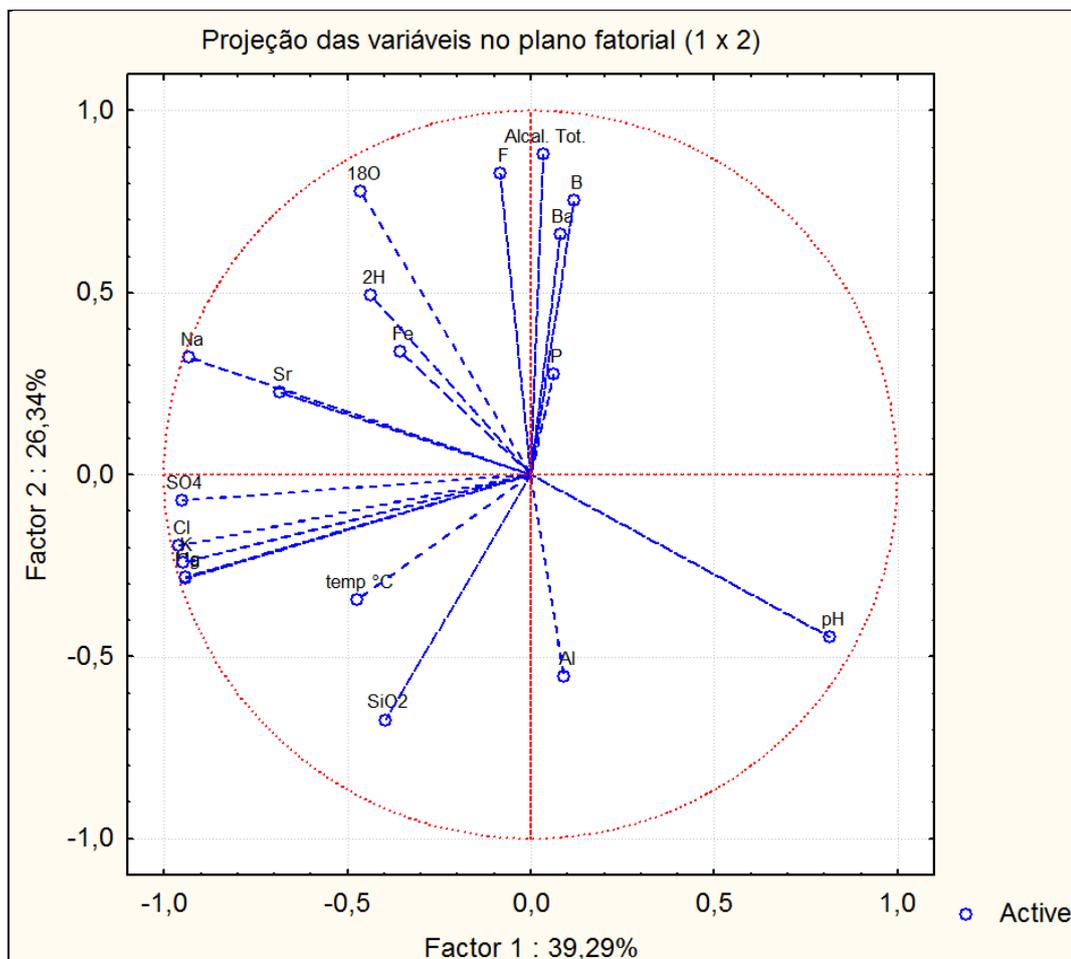


Figura 59. Representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes principais do SAG.

Na Figura 60 é possível observar as representações gráficas dos *scores* para as duas primeiras componentes principais, onde as amostras se agrupam com exceção da amostra S-236-BR-SJ, cujo poço capta também o aquífero permiano Pré-SAG (Rio do Rasto). Esta amostra tem assinatura hidrogeoquímica marcada pelo pH mais baixo, íons cálcio, cloreto, magnésio, potássio, sódio e sulfato muito elevados, o que a destaca em relação as demais amostras que captam em sua maior parte o SAG. As águas que possuem maior relação com o fator 2 apresentam assinatura regida pela alta alcalinidade, teores de flúor, boro e bário elevados e  $^{18}\text{O}$  menos depletado.

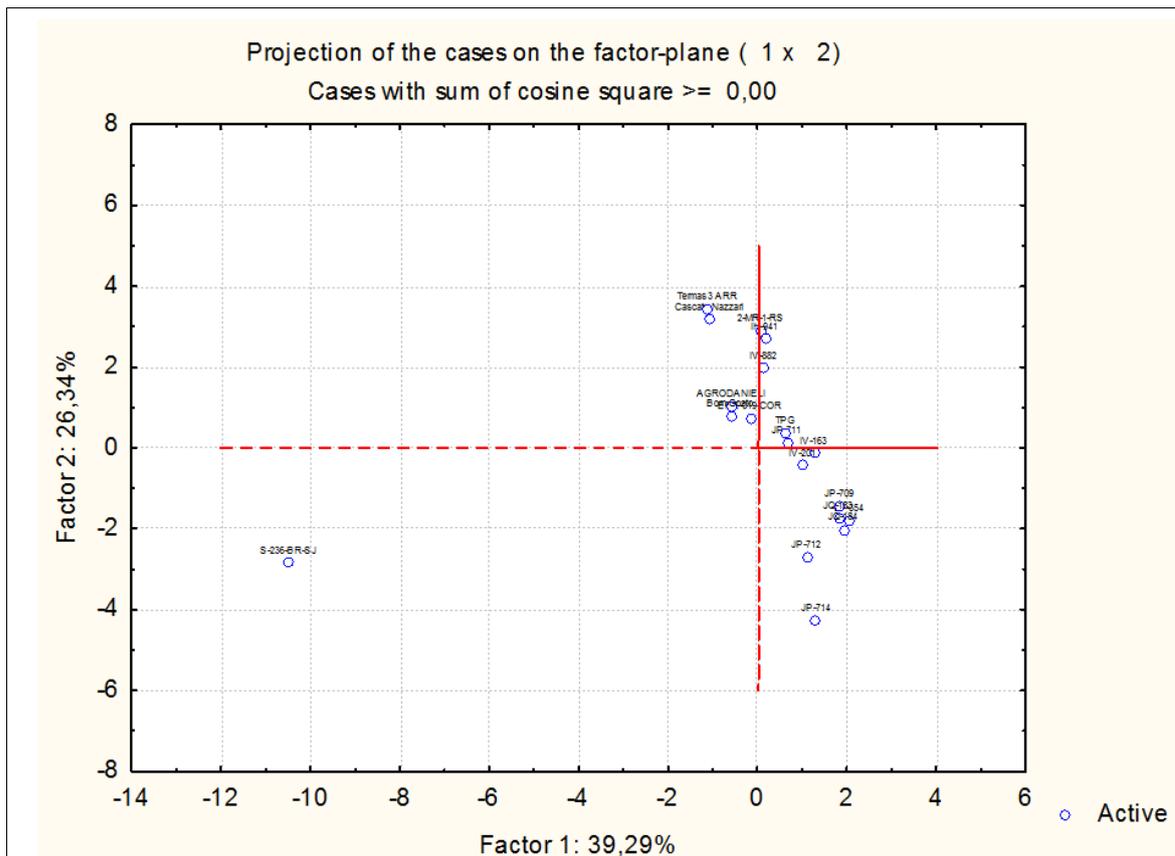


Figura 60. Representação gráfica dos escores das duas primeiras componentes principais.

A Figura 61 e Figura 62 apresentam, respectivamente, os mapas de escores fatoriais para as amostras do SAG em sua primeira e segunda componente, interpolados até um raio de 25 km a partir do poço com as informações presentes na Tabela 13. Observa-se na Figura 61 a diferente assinatura das águas e a relação com a superfície potenciométrica do SAG (LEBAC, 2008), onde se verifica que quanto mais profundo o nível, maior a salinidade e maior a influência dos aquíferos Pré-SAG no setor oeste e noroeste da área de estudo.

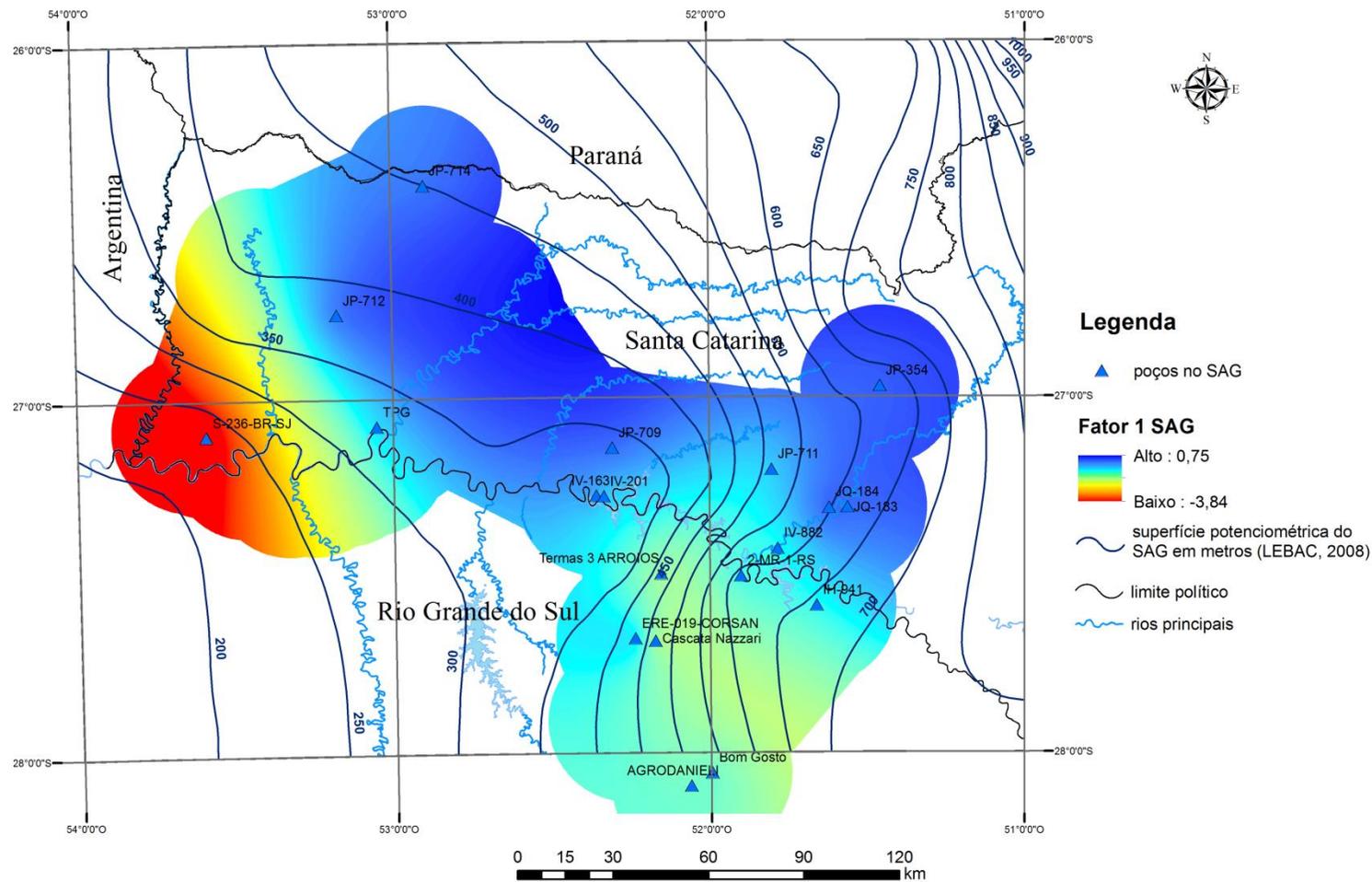


Figura 61. Mapa de escores fatoriais da 1ª componente principal nas amostras coletadas no SAG com a devida superfície potenciométrica.

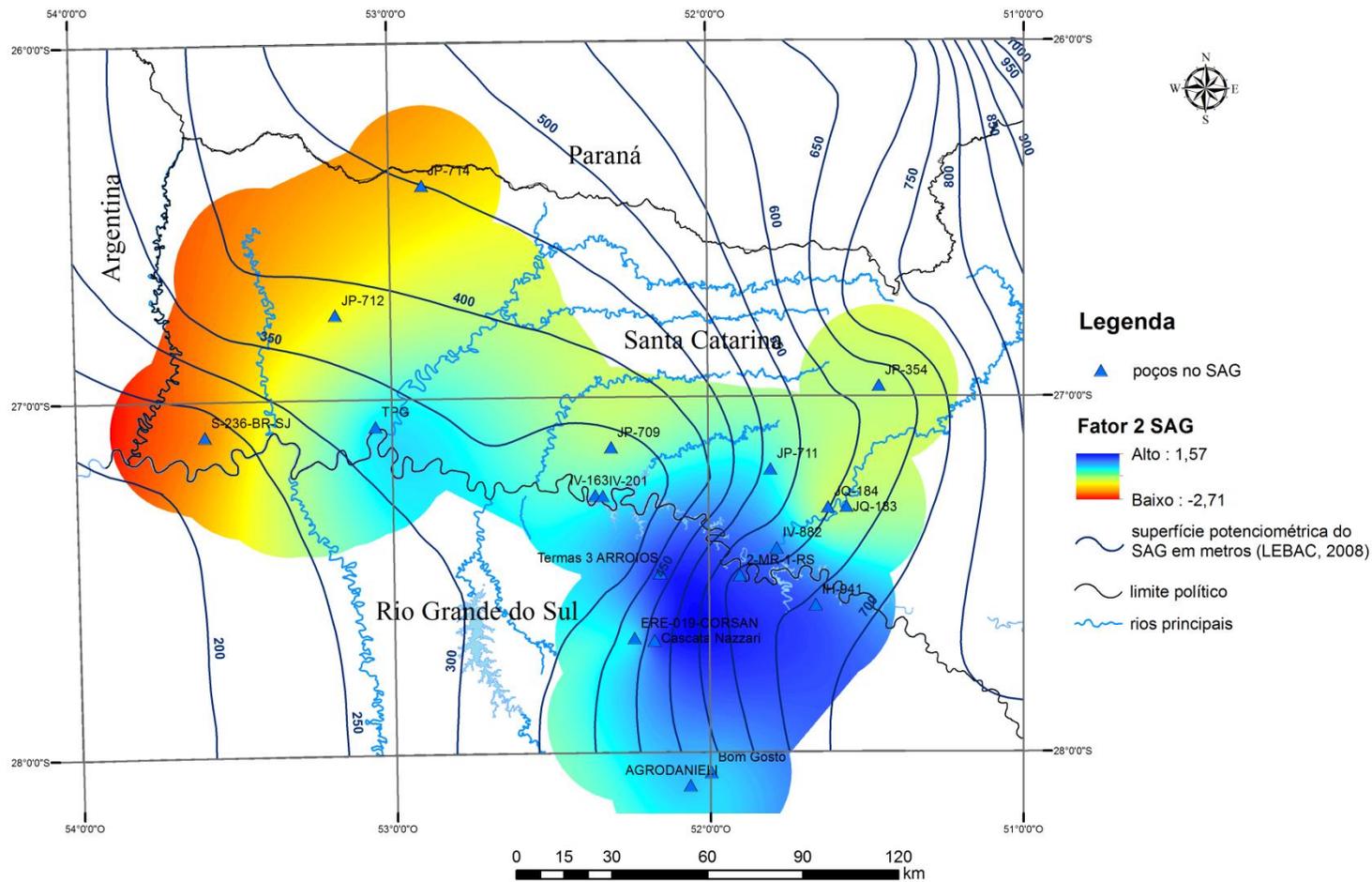


Figura 62. Mapa de escores fatoriais da 2ª componente principal nas amostras coletadas no SAG com a devida superfície potenciométrica.

Na Figura 62 o fator 2, característico de águas mais alcalinas e ricas em flúor e boro, está evidente no setor sudeste da área, mais especificamente na região de Marcelino Ramos e Erechim. Junto a foz do Rio Chapecó e no Rio Uruguai há uma leve tendência de ocorrer tal fenômeno, especialmente na região de Iraí e Vicente Dutra no Rio Grande do Sul.

Tabela 13. Escores fatoriais dos poços que captam água do SAG.

<b>Poço</b>	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
S-236-BR-SJ	-3,84095	-1,26648	-0,02664	0,44703	-0,20369
2-MR-1-RS	0,02926	1,29960	-0,88165	-0,49574	-0,15756
Cascata Nazzari	-0,39441	1,42322	-2,24907	-0,16357	0,29055
ERE-019-COR	-0,05871	0,33122	1,18709	-1,76318	-3,18436
IH-941	0,06364	1,20687	-0,63912	-1,05884	0,31613
IV-882	0,04673	0,87890	0,59448	-0,41657	0,18171
Termas 3 ARR	-0,40788	1,53728	2,40181	-0,07659	0,94550
IV-163	0,46293	-0,05978	0,87664	1,42665	0,17017
IV-201	0,37002	-0,19883	-0,71179	1,26679	-1,35087
JP-711	0,24480	0,06326	0,71698	0,65755	0,21716
TPG	0,23467	0,17611	0,86038	1,22046	0,56402
AGRODANIELI	-0,21254	0,46937	-0,50845	0,15864	0,67422
Bom Gosto	-0,22029	0,36473	-0,77512	-0,08118	0,60683
JP-354	0,74709	-0,79896	-0,37129	0,69625	-0,50948
JP-709	0,67603	-0,64461	0,19061	0,80128	0,13719
JP-712	0,40486	-1,20205	0,42361	-1,37277	1,36321
JP-714	0,48128	-1,90941	-0,12500	-2,02837	0,97939
JQ-183	0,66674	-0,77106	-0,45235	0,60685	-0,47869
JQ-184	0,70675	-0,89941	-0,51113	0,17532	-0,56143

#### 9.6.4. Análise de Componentes Principais SASG

A Análise de Componentes Principais realizada para as 39 amostras de poços que captam águas do SASG com CE anômala utilizou as mesmas 19 variáveis escolhidas para o estudo do SAG. Os autovalores obtidos (Tabela 14) permitiram a retenção das 5 primeiras componentes principais cujos autovalores são superiores a 1 (um). As 5 primeiras

componentes principais retidas explicam 76,85 % da variância. Assim como na ACP do SAG, a redução da dimensionalidade é de 19 para 5.

Tabela 14. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SASG

<b>Componentes</b>	<b>Autovalores</b>	<b>% de variância explicada</b>	<b>% de variância explicada acumulada</b>
1	5,557195	29,24840	29,2484
2	3,136163	16,50612	45,7545
3	2,316756	12,19345	57,9480
4	2,087894	10,98892	68,9369
5	1,503534	7,91334	76,8502
6	0,990074	5,21092	82,0611
7	0,791367	4,16509	86,2262
8	0,642708	3,38267	89,6089
9	0,519314	2,73323	92,3421
10	0,447885	2,35729	94,6994
11	0,366822	1,93064	96,6301
12	0,174747	0,91972	97,5498
13	0,168712	0,88796	98,4377
14	0,133144	0,70076	99,1385
15	0,057436	0,30229	99,4408
16	0,052756	0,27766	99,7185
17	0,035685	0,18782	99,9063
18	0,015427	0,08119	99,9875
19	0,002380	0,01253	100,0000

Os *loadings* das componentes principais para cada uma das 19 variáveis estão relacionados na Tabela 15. De acordo com os maiores valores absolutos dos *loadings* é possível afirmar que as variáveis que mais contribuiriam para a formação da primeira componente principal foram o cálcio, o cloreto, o sulfato e o deutério. Também colaboraram os elementos magnésio e sódio. Para a segunda componente principal contribuiriam a sílica e o isótopo <sup>18</sup>O. Na formação da terceira componente o ferro e o flúor foram importantes. Na quarta componente somente o fósforo teve contribuição na sua formação. Para a quinta componente principal nenhum parâmetro teve contribuição importante.

Tabela 15. Matriz de *loadings* das componentes principais das variáveis do SASG.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
temp °C	0,478848	-0,562432	0,294156	0,218191	0,170824
pH	0,446438	-0,410969	-0,488837	-0,392671	-0,106906
Alcal. Tot.	0,507648	-0,126342	0,436386	0,292714	0,481449
Ca <sup>2+</sup>	<b>-0,890684</b>	-0,102677	0,055700	-0,316821	-0,150017
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,871338</b>	-0,318141	0,125030	-0,044640	-0,029807
Fe total	-0,118002	0,135107	<b>-0,781025</b>	-0,073669	0,173046
F <sup>-</sup>	-0,222378	-0,372126	<b>-0,750008</b>	0,023307	0,234028
Mg <sup>2+</sup>	-0,676232	0,213548	0,000671	0,377345	-0,156360
K <sup>+</sup>	-0,530778	-0,313221	0,171473	0,401345	0,339657
SiO <sub>2</sub>	-0,066383	<b>0,865688</b>	-0,215367	0,175597	-0,004904
Na <sup>+</sup>	-0,666118	-0,539397	-0,034420	0,364018	0,194374
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>-0,727658</b>	-0,325936	-0,288544	0,404347	0,012398
Al <sup>3+</sup>	-0,079102	-0,050082	0,264804	-0,138052	-0,448859
B <sup>3+</sup>	0,389766	-0,200001	-0,358654	-0,401415	0,426443
Ba <sup>2+</sup>	0,115398	0,375772	0,326433	-0,267082	0,546378
P <sup>5+</sup>	-0,585233	-0,061774	0,211966	<i>-0,694714</i>	0,046835
Sr <sup>2+</sup>	-0,590133	-0,231179	0,281361	-0,522402	0,327440
<sup>2</sup> H	<b>-0,757914</b>	0,497223	0,039977	-0,168239	0,100353
<sup>18</sup> O	-0,318845	<b>0,766794</b>	-0,135473	0,162507	0,379356

Na Figura 63, que exibe a representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes, visualiza-se quais as variáveis que mais contribuíram para as duas primeiras componentes principais. Do mesmo modo é possível verificar que o ferro e o alumínio não contribuem para a formação das mesmas. A temperatura pouco influi para a formação das componentes principais.

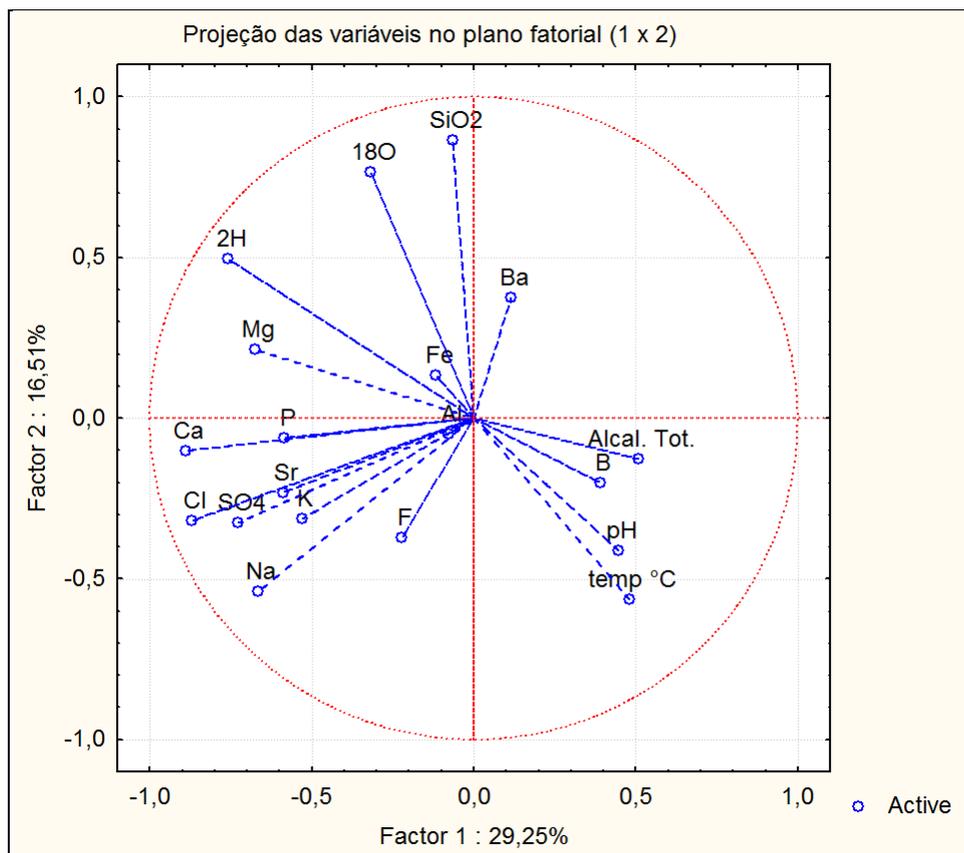


Figura 63. Representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes principais do SASG.

As representações gráficas dos *scores* para as duas primeiras componentes principais são apresentadas na Figura 64, onde as amostras associam-se em três grupos com exceção das amostras SGAR, IN-701 e IN-710.

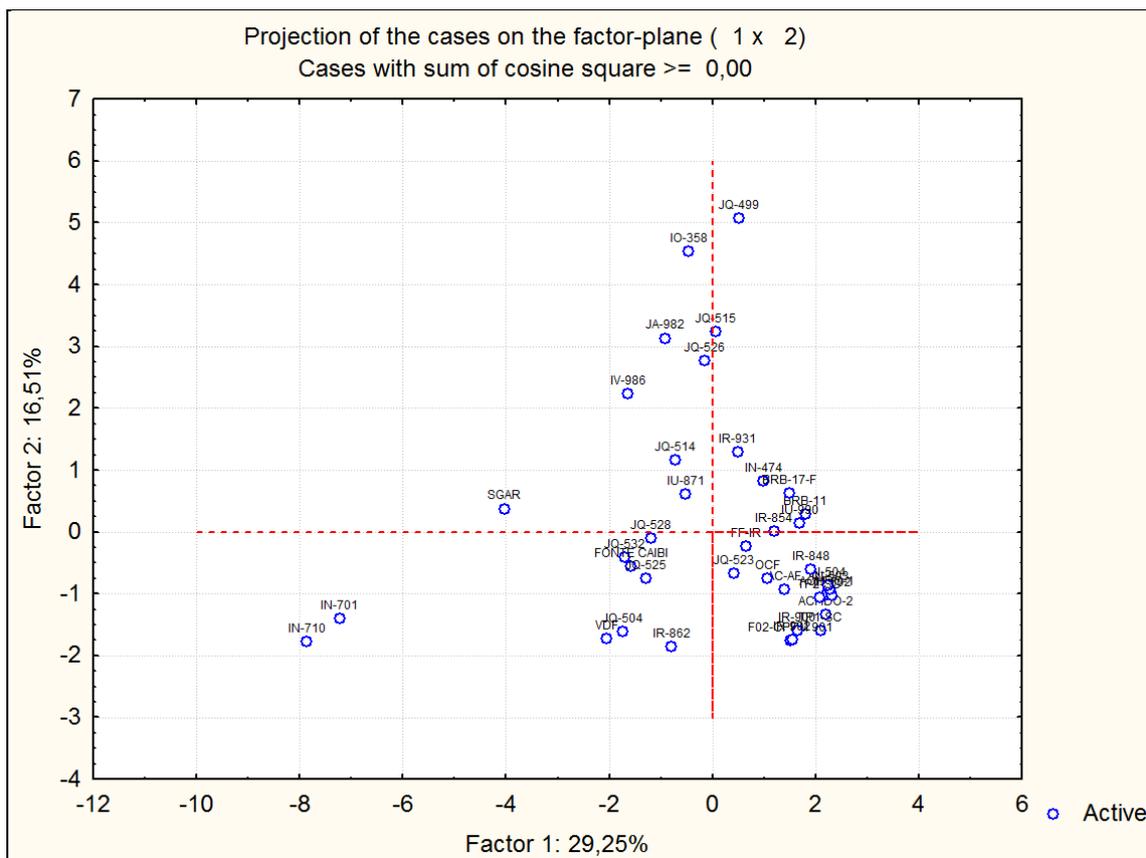


Figura 64. Representação gráfica dos *scores* das duas primeiras componentes principais.

Os mapas de escores fatoriais para a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> componentes principais obtidos através das informações da Tabela 16 estão representados na Figura 65 e, respectivamente. O fator 1 está relacionado a águas com altos teores de sais dissolvidos devido a excessos de cálcio, cloreto e sulfato, além do deutério mais depletado. Esta assinatura assemelha-se ao fator 1 do SAG, relacionado a provável mistura com águas dos aquíferos permianos representantes do Pré-SAG. O fator 2 onde os teores de SiO<sub>2</sub> são elevados e o isótopo <sup>18</sup>O é mais depletado manifesta-se de modo mais acentuado na região de Estação e nos poços com águas frias das comunidades rurais de Vicente Dutra, junto ao Rio Uruguai, no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 16. Escores fatoriais das componentes principais do SASG.

	<b>Fator 1</b>	<b>Fator 2</b>	<b>Fator 3</b>	<b>Fator 4</b>	<b>Fator 5</b>
IN-701	-3,06557	-0,79516	-0,25933	1,51940	-1,66223
IN-710	-3,33393	-1,00236	1,47885	-3,55039	0,64475
SGAR	-1,71062	0,21186	0,72589	-1,02850	-1,28125
IR-862	-0,33481	-1,04444	0,53428	1,67011	-0,17807
JQ-504	-0,73941	-0,90636	0,44832	1,92000	0,87419
JQ-532	-0,71889	-0,23216	0,23391	1,68576	0,33823
VDF	-0,86800	-0,97294	0,22653	2,16235	1,03107
FONTE CAIBI	-0,67007	-0,31346	0,20880	-0,66243	1,69303
IO-358	-0,19347	2,55945	1,13550	0,83522	-0,55609
IR-931	0,20843	0,73177	-0,97966	-0,30485	-0,19872
IU-871	-0,21876	0,34054	-0,77316	-0,90983	-0,46247
IV-986	-0,69143	1,26069	-0,34183	-0,08752	-0,27243
JQ-499	0,21685	2,86472	1,23188	-0,16741	1,72384
JQ-515	0,02661	1,82828	0,28684	0,11670	0,20228
JQ-526	-0,06466	1,56555	-0,19445	0,27267	0,20731
JA-982	-0,38788	1,76944	-1,17952	-0,02002	1,55618
JQ-514	-0,30483	0,65435	-0,24865	1,13376	-0,19304
JQ-523	0,17491	-0,37789	-3,67840	-1,55252	0,99309
JQ-525	-0,54386	-0,42652	-2,80773	0,60525	-0,34725
JQ-528	-0,50817	-0,05539	-1,62508	0,52283	-0,76558
ACHDO-1	0,93858	-0,56758	0,38176	-0,23470	0,31993
ACHDO-2	0,93075	-0,75894	0,41172	-0,10005	0,36584
IN-474	0,42093	0,45945	1,25630	-0,39171	-2,69392
IN-502	0,98682	-0,58112	0,44870	-0,02361	-0,76544
IN-503	0,96703	-0,52352	0,32042	-0,07010	-0,76044
IN-504	0,94780	-0,49261	0,27595	-0,11139	-0,75258
IR-848	0,81154	-0,34297	-0,00540	-0,40695	-0,63595
TP1-SC	0,88909	-0,89783	0,41483	-0,29384	0,12027
TP2-SC	0,88282	-0,59851	0,09708	-0,39671	-0,67190
AC-AF	0,59587	-0,52224	0,15942	-0,30478	0,39988
BRB-11	0,76616	0,16024	-0,31649	-0,45034	-1,12201
BRB-17-F	0,63589	0,35111	0,11274	-0,47166	-0,91125
F02-CPRM 901	0,64529	-0,99041	0,64182	-0,11509	1,01802
FF-IR	0,27486	-0,13073	0,01152	0,06357	1,16767
IR-854	0,50680	0,00463	-0,13176	-0,16854	-0,10870
IR-900	0,69607	-0,90367	0,57117	-0,18684	1,01496
IR-902	0,65911	-0,98062	0,80208	-0,09099	0,73564
IU-990	0,71822	0,07805	-0,42384	-0,50593	-1,47687
OCF	0,45397	-0,42268	0,54899	0,09906	1,41001

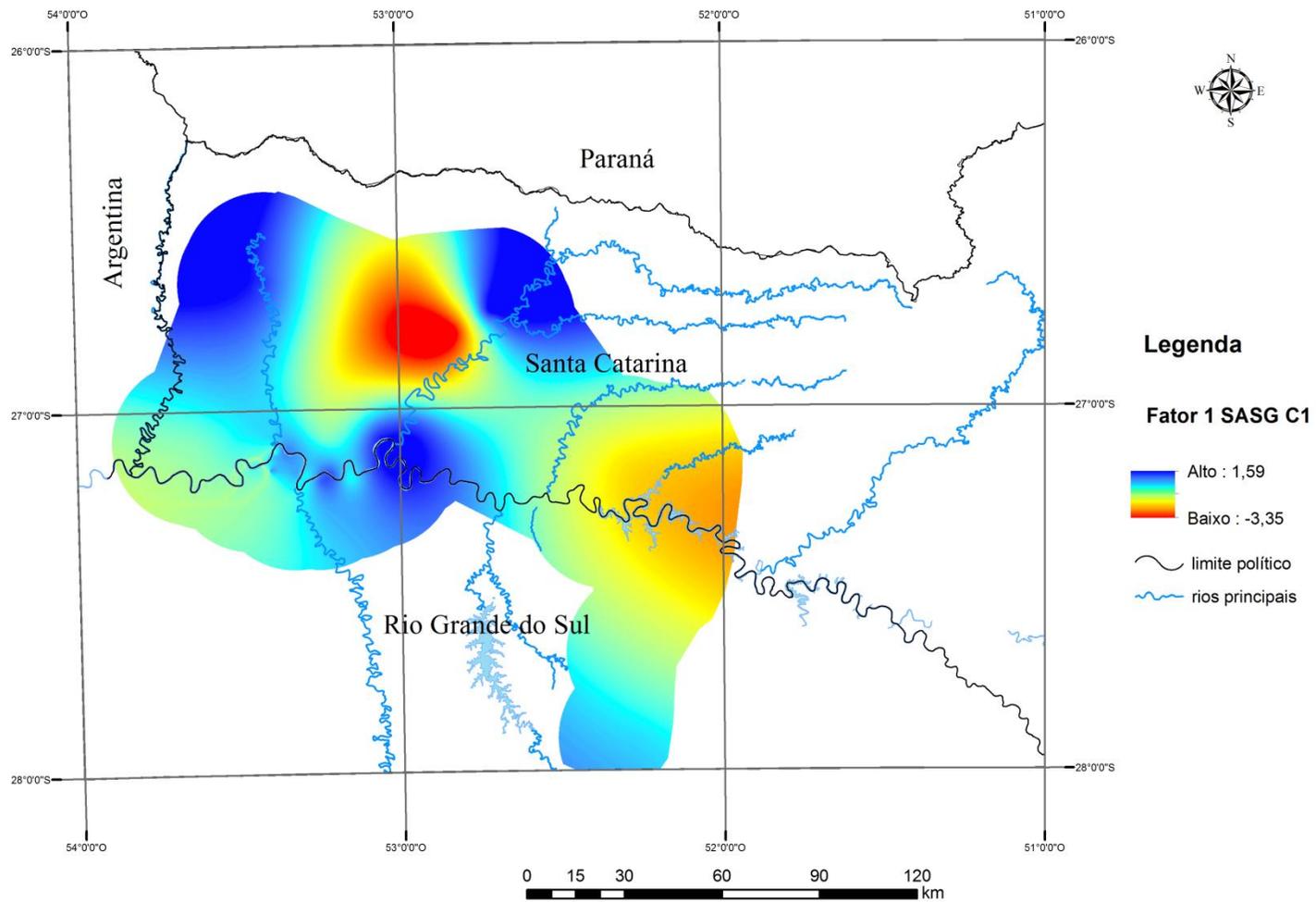


Figura 65. Mapa de escores fatoriais para a 1ª componente principal do SASG.

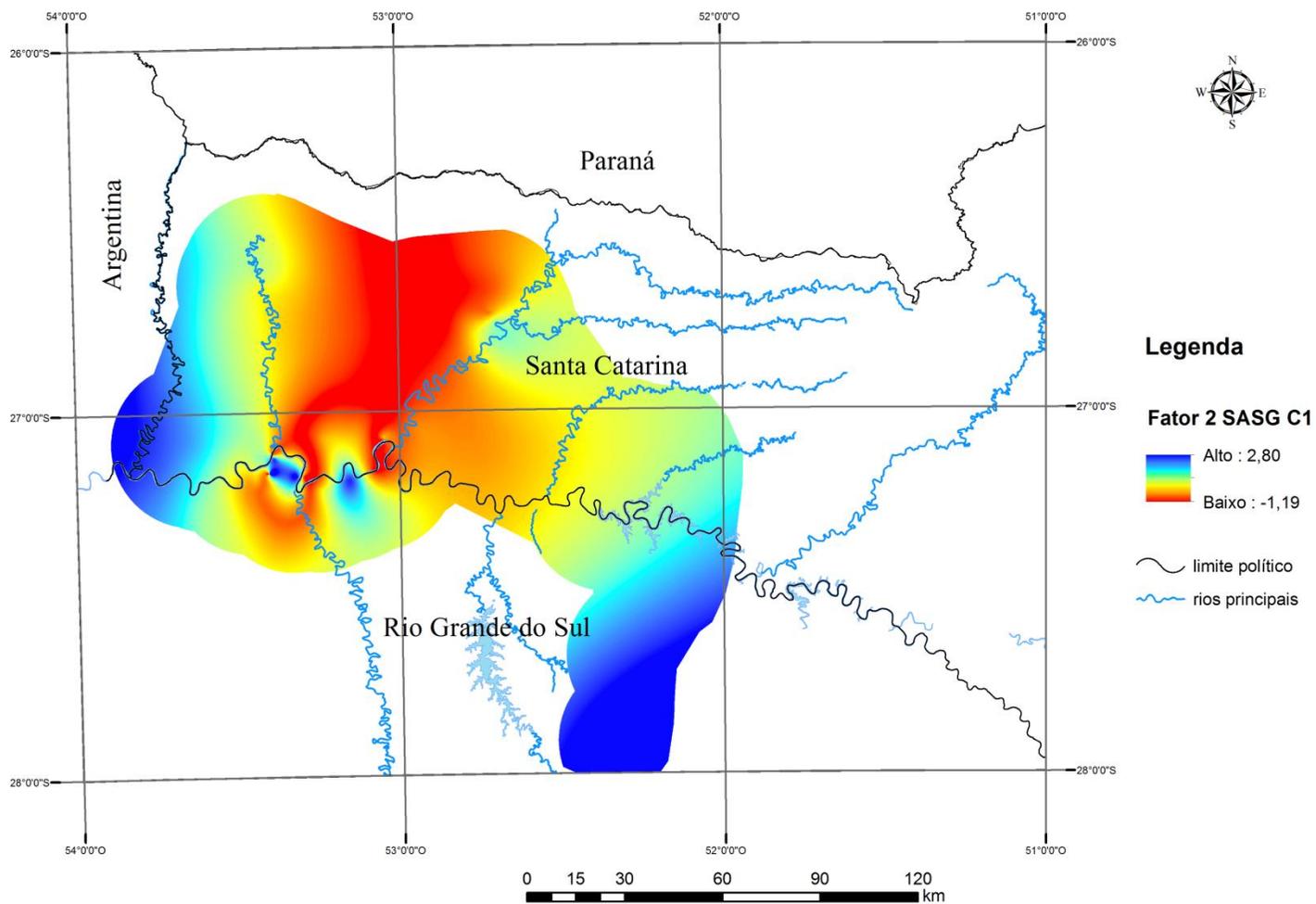


Figura 66. Mapa de escores fatoriais para a 2ª componente principal do SASG.

### 9.6.5. Análise de Componentes Principais Integrada (SAG+SASG)

Com a premissa de que há interação entre o SAG e o SASG na área de estudo foi realizada uma Análise de Componentes Principais para as 58 amostras de poços que captam o SAG e o SASG anômalo em relação a CE. As amostras de água dos dois sistemas aquíferos foram tratadas como se fossem uma única população. As mesmas 19 variáveis escolhidas para as ACPs anteriores foram escolhidas.

Os autovalores obtidos (Tabela 17) permitiram a retenção de das 6 primeiras componentes principais cujos autovalores são superiores a um, com 79,91 % da variância explicada, com uma redução da dimensionalidade de 19 para 6 variáveis.

Tabela 17. Autovalores obtidos na Análise de Componentes Principais do SAG+SASG.

<b>Componentes</b>	<b>Autovalores</b>	<b>% de variância explicada</b>	<b>% de variância explicada acumulada</b>
1	5,658042	29,77917	29,7792
2	2,480392	13,05469	42,8339
3	2,276012	11,97901	54,8129
4	2,067201	10,88001	65,6929
5	1,692972	8,91038	74,6033
6	1,009834	5,31491	79,9182
7	0,839111	4,41638	84,3345
8	0,754732	3,97227	88,3068
9	0,557538	2,93441	91,2412
10	0,402434	2,11808	93,3593
11	0,364349	1,91763	95,2769
12	0,236204	1,24318	96,5201
13	0,169528	0,89225	97,4124
14	0,158604	0,83476	98,2471
15	0,152812	0,80427	99,0514
16	0,083047	0,43709	99,4885
17	0,066704	0,35107	99,8396
18	0,022903	0,12054	99,9601
19	0,007580	0,03989	100,0000

A Tabela 18 contém os *loadings* das componentes principais para cada uma das 19 variáveis utilizadas na análise integrada. Com a maior contribuição na composição da primeira componente principal destaca-se o cálcio, o cloreto, o magnésio, o sódio e o sulfato. Também auxiliaram o pH, os elementos potássio e estrôncio, bem como o isótopo estável deutério. Na formação da segunda componente principal ressalta-se o papel principal do isótopo estável  $^{18}\text{O}$ . Como coadjuvantes aparecem a alcalinidade total, o flúor e o bário. A formação da terceira componente é controlada de forma mais intensa pela sílica, mas tem contribuição da temperatura. Na quarta componente somente o fósforo contribuiu para sua formação. Para a quinta componente principal o ferro aparece como único elemento a contribuir na sua formação, enquanto que a sexta componente está controlada exclusivamente pelo alumínio.

Tabela 18. Matriz de *loadings* das componentes principais das variáveis da análise integrada SAG+SASG.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
temp °C	0,283653	-0,077051	-0,618716	-0,358892	0,265910	0,118238
pH	0,616764	-0,286568	-0,112910	0,294325	-0,325812	0,080948
Alcal. Tot.	0,332261	0,621174	-0,532628	-0,099923	0,248852	-0,094863
Ca <sup>2+</sup>	<b>-0,848496</b>	-0,175320	0,008942	0,336170	0,022675	-0,055591
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,902386</b>	-0,192458	-0,238458	0,012816	0,017530	0,005194
Fe total	-0,130695	0,277935	0,268320	0,025090	<b>-0,704965</b>	-0,177271
F <sup>-</sup>	-0,098814	0,615133	-0,394741	0,058515	-0,466910	-0,316524
Mg <sup>2+</sup>	<b>-0,741782</b>	-0,035309	0,207733	-0,333621	0,018461	-0,096899
K <sup>+</sup>	-0,640162	-0,099239	-0,343620	-0,427989	0,053884	0,191407
SiO <sub>2</sub>	-0,138592	0,191522	<b>0,766022</b>	-0,356603	0,078541	0,220404
Na <sup>+</sup>	<b>-0,757159</b>	0,062713	-0,498450	-0,203516	-0,168600	0,010108
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>-0,809917</b>	-0,080443	-0,157086	-0,270719	-0,338908	0,006420
Al <sup>3+</sup>	-0,059239	-0,275862	0,052038	0,148678	0,284251	-0,802361
B <sup>3+</sup>	0,274404	0,311594	-0,161262	0,398000	-0,451609	0,231401
Ba <sup>2+</sup>	0,186808	0,621145	-0,134041	0,232627	0,447077	0,025393
P <sup>5+</sup>	-0,519154	-0,104409	0,050887	<b>0,745657</b>	0,121880	0,145588
Sr <sup>2+</sup>	-0,600382	0,011315	-0,249743	0,584902	0,177112	0,175323
<sup>2</sup> H	-0,669704	0,433922	0,295023	0,200413	0,196240	-0,024611
<sup>18</sup> O	-0,353550	<b>0,816428</b>	0,303608	-0,123706	0,127759	0,017619

A Figura 67 ilustra a representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes com a visualização das variáveis que mais contribuíram para as duas primeiras componentes principais.

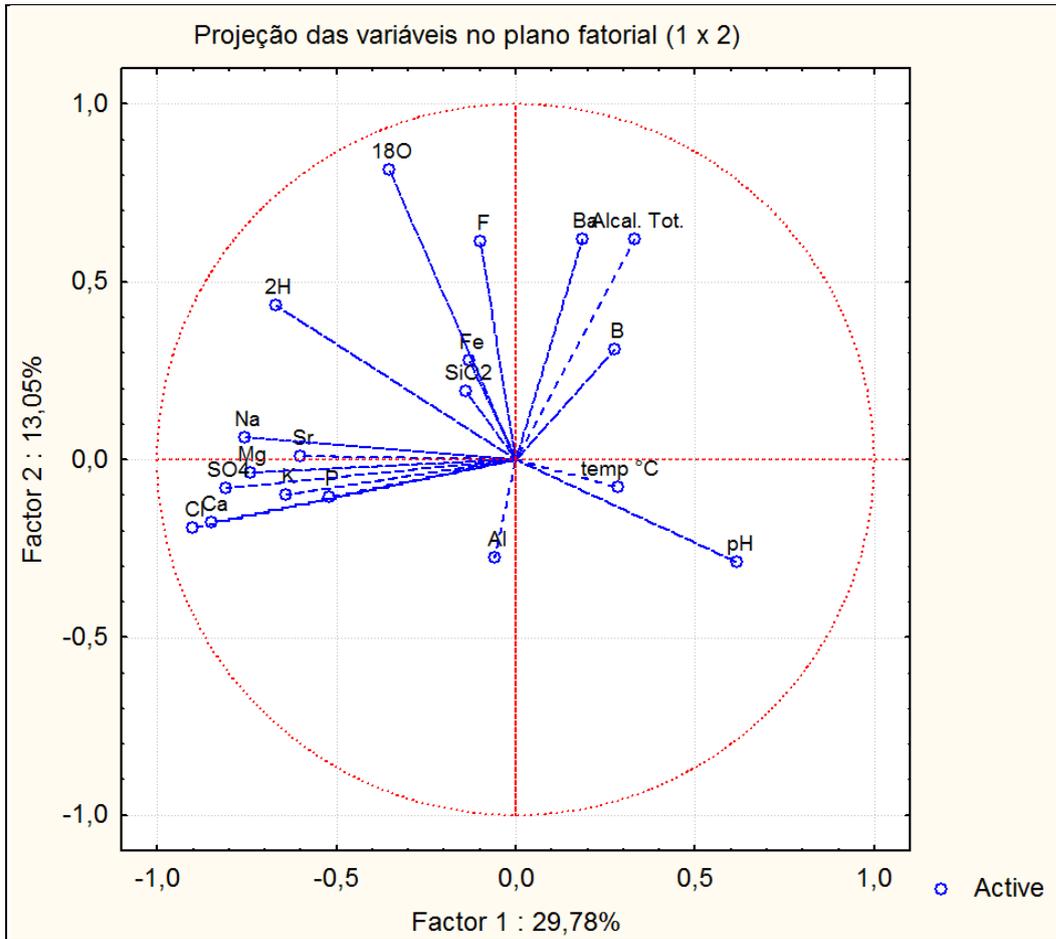


Figura 67. Representação gráfica dos *loadings* das duas primeiras componentes principais da análise integrada SAG+SASG.

Os escores para as duas primeiras componentes principais estão dispostos na Figura 68 onde se verifica que as amostras estão reunidas em quatro grupos com exceção da amostra relacionada ao poço SGAR. O grupo que reúne as amostras S-236-BR-SJ, IN-701 e IN-710 está isolado dos demais, indicando que apresentam assinatura hidrogeoquímica diferenciada.

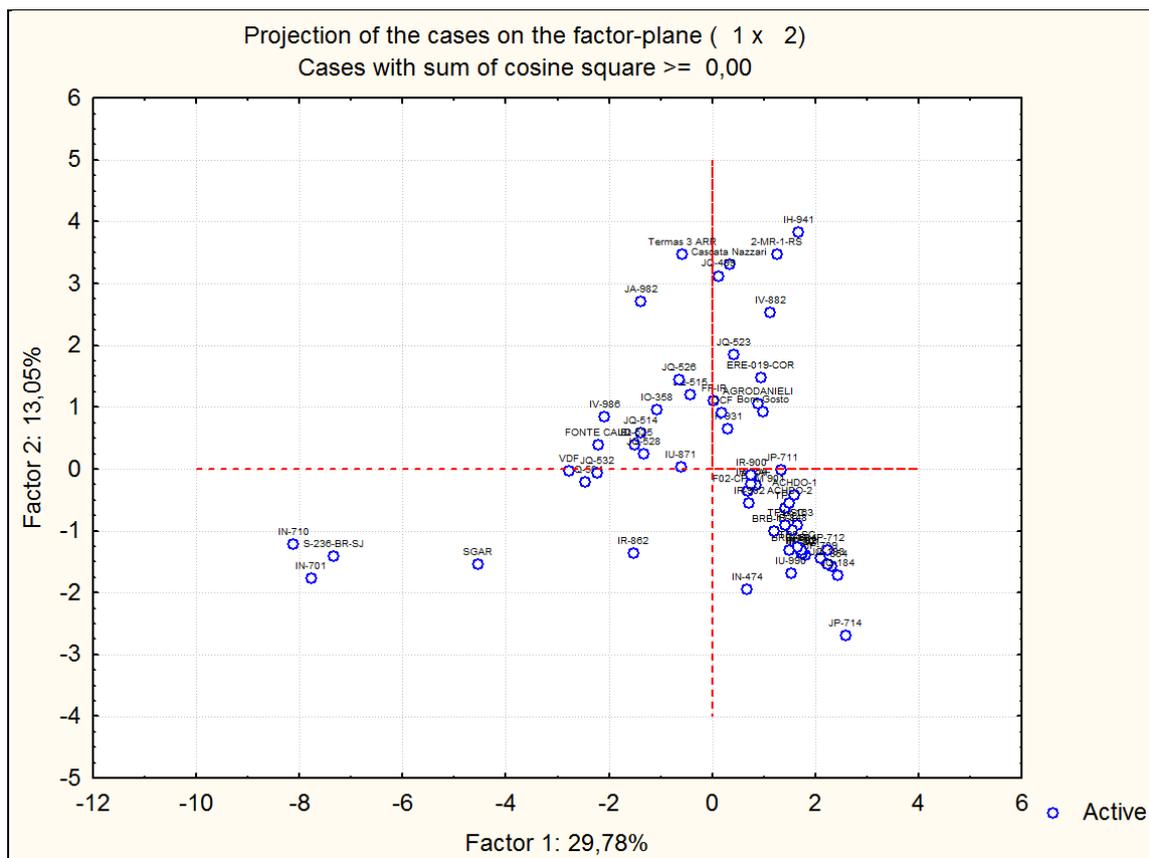


Figura 68. Representação gráfica dos *scores* das duas primeiras componentes principais na análise integrada SAG+SASG.

A Figura 69 e a Figura 70 representam respectivamente os mapas de escores fatoriais para a 1ª e 2ª componentes principais de acordo com os valores contidos na Tabela 19.

O fator 1 está relacionado a águas com pH menos alcalino, elevados teores de sais dissolvidos decorrentes da concentração demasiada dos íons cálcio, cloreto, magnésio, potássio, sódio e sulfato, além de estrôncio e do deutério mais depletado (Figura 69). Esta assinatura está relacionada a provável mistura com águas dos aquíferos permianos representantes do Pré-SAG, que ascendem por meio de fluxos verticais em grandes falhas e/ou fraturas. Caso não haja mistura com águas de recarga meteórica e consequente resfriamento, pode ocorrer termalismo associado.

O fator 2, caracterizado por águas menos empobrecidas em  $^{18}\text{O}$ , alta alcalinidade total, com consideráveis teores de flúor e bário, manifesta-se no setor sudeste da área de estudo (Figura 70).

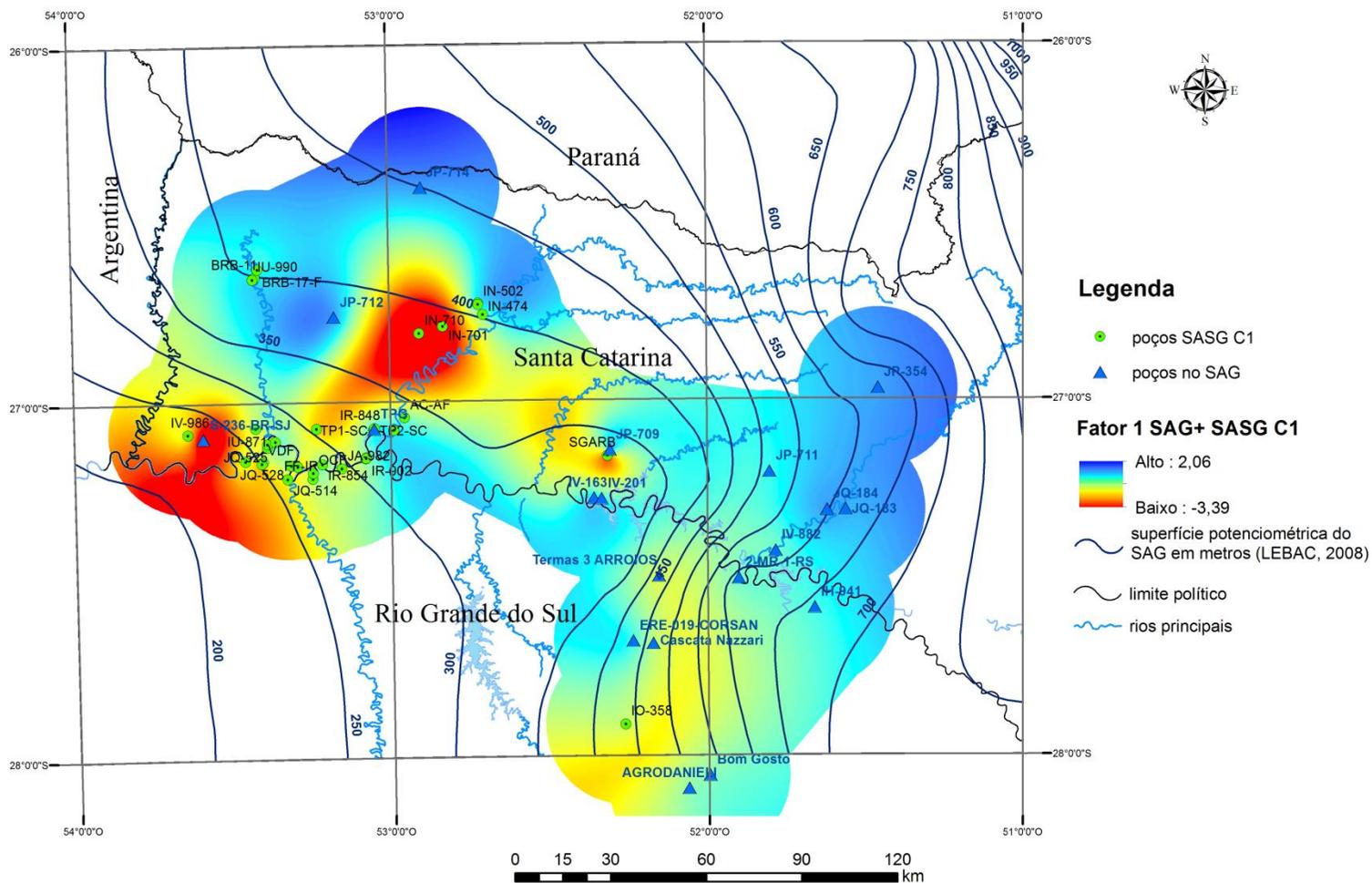


Figura 69. Mapa de escores fatoriais para a 1ª componente principal do SAG+SASG.

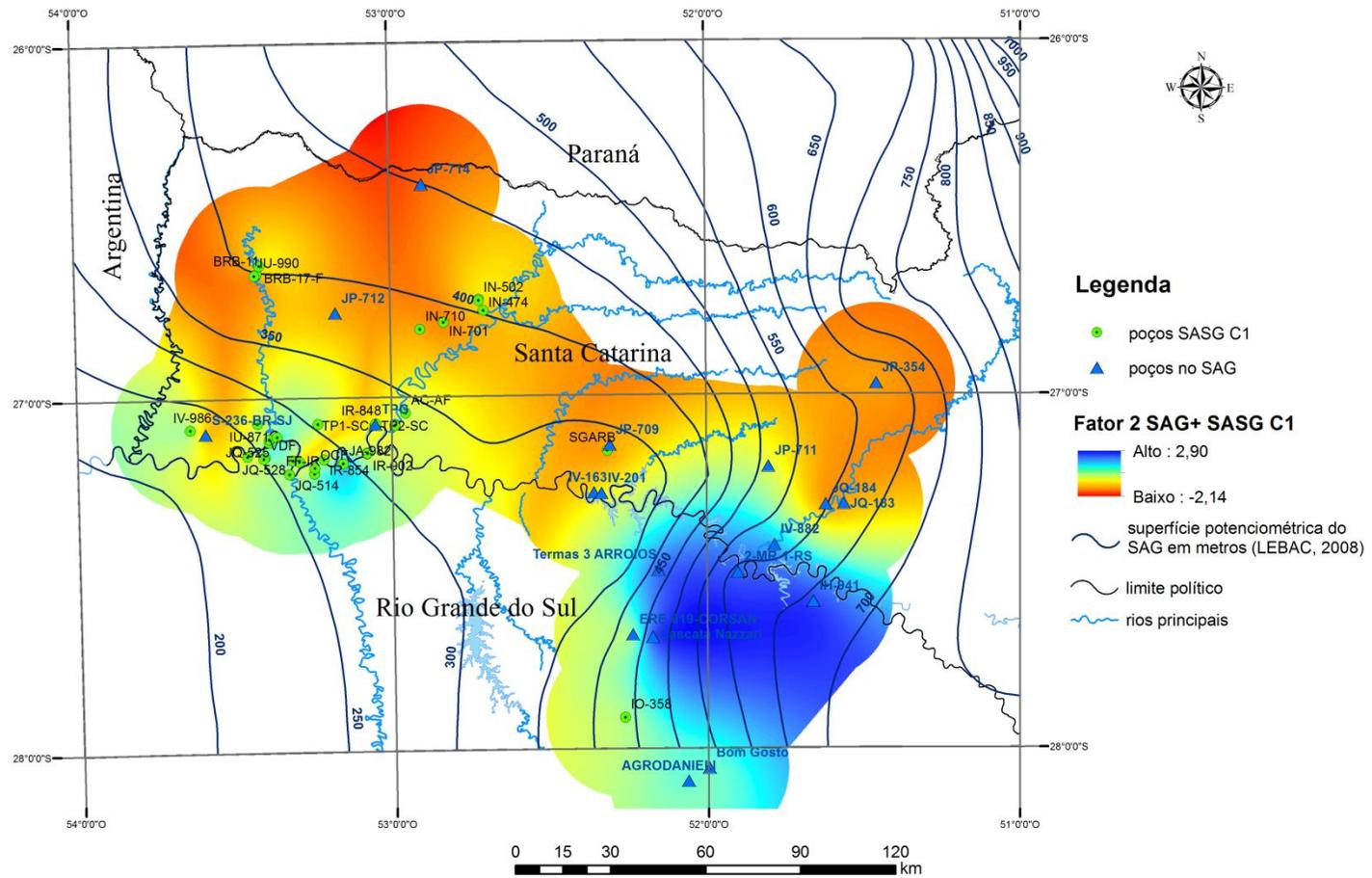


Figura 70. Mapa de escores fatoriais para a 2ª componente principal do SAG+SASG.

Tabela 19. Escores fatoriais das componentes principais do SAG+SASG.

<b>Casos</b>	<b>Fator1</b>	<b>Fator2</b>	<b>Fator3</b>	<b>Fator4</b>	<b>Fator5</b>	<b>Fator6</b>
S-236-BR-SJ	-3,08364	-0,90051	-1,64422	-3,10403	0,78606	1,54689
2-MR-1-RS	0,52599	2,19951	-1,27547	0,02854	0,56071	-0,80113
Cascata Nazzari	0,13914	2,10463	-1,56618	-0,59326	-0,14236	-1,19781
ERE-019-COR	0,39411	0,93734	-0,30084	0,86145	1,11830	0,02905
IH-941	0,70325	2,43362	-1,87694	-0,19341	0,47889	-0,94004
IV-882	0,47316	1,60543	-0,86946	0,07956	1,24719	-0,02066
Termas 3 ARR	-0,24646	2,20145	-0,57068	0,77327	0,75996	-0,05434
IV-163	0,69570	-0,57719	-0,28319	0,25268	0,15764	0,41342
IV-201	0,75901	-0,88182	-0,68257	-0,04148	-0,19585	0,31316
JP-711	0,56246	-0,00907	-0,34884	0,09583	0,49504	0,27215
TPG	0,59454	-0,40559	-0,83631	0,22325	-0,17230	0,49305
AGRODANIELI	0,37515	0,66931	-1,05455	-0,60815	0,07780	0,32518
Bom Gosto	0,41722	0,58888	-0,98796	-0,63685	0,25536	0,34324
JP-354	0,97192	-1,00357	0,32018	-0,01940	0,07085	0,03947
JP-709	0,88578	-0,91969	0,24643	0,13699	0,30386	0,21246
JP-712	0,94494	-0,83409	0,24157	-0,47104	0,64803	0,43755
JP-714	1,08566	-1,71393	0,03206	-0,79490	1,00804	-0,11757
JQ-183	0,94249	-0,97879	0,26226	-0,03824	0,07666	0,12060
JQ-184	1,02339	-1,09472	0,07825	-0,07933	0,16997	-0,13197
IN-701	-3,26970	-1,11960	-0,17334	-0,96675	-0,57458	-1,86298
IN-710	-3,41335	-0,77677	-0,93711	4,79162	1,47053	-0,04612
SGAR	-1,91148	-0,97778	0,80136	1,45161	0,48943	0,58293
IR-862	-0,64152	-0,86930	-0,72479	-1,26992	-0,20756	-0,03556
JQ-504	-1,03100	-0,13450	-0,82931	-1,44745	-0,09493	0,11490
JQ-532	-0,93470	-0,04288	-0,05769	-1,27372	-0,02441	-0,33239
VDF	-1,16340	-0,01833	-0,91601	-1,59082	-0,35725	0,36422
FONTE CAIBI	-0,93047	0,24906	-0,26738	1,32975	-0,49301	1,88395
IO-358	-0,44682	0,60371	2,69375	-1,11759	1,83519	0,44141
IR-931	0,12437	0,41484	1,22940	0,09146	-0,61319	0,37552
IU-871	-0,25683	0,01788	0,77300	0,89563	-0,53170	0,32084
IV-986	-0,87500	0,53906	1,65956	0,20341	-0,15873	0,54421
JQ-499	0,05194	1,98298	2,13636	-0,24858	2,45036	0,45961
JQ-515	-0,17643	0,76412	1,96649	-0,32747	0,86856	0,91333

Tabela 19 (continuação)

Casos	Fator1	Fator2	Fator3	Fator4	Fator5	Fator6
JQ-526	-0,27005	0,91994	1,80308	-0,37750	0,15395	0,60863
JA-982	-0,57967	1,72239	2,00916	-0,20243	-1,30203	0,17196
JQ-514	-0,58298	0,37132	1,01903	-0,97911	-0,33870	-1,01006
JQ-523	0,17169	1,17707	0,42625	1,49315	-4,23259	-0,48512
JQ-525	-0,62819	0,24902	0,54038	-0,71220	-3,28818	-1,00887
JQ-528	-0,56098	0,15154	0,52877	-0,47411	-1,34769	-1,30918
ACHDO-1	0,67036	-0,26402	-0,48183	0,30535	-0,07947	0,12897
ACHDO-2	0,62830	-0,34886	-0,65328	0,20236	-0,15242	0,19187
IN-474	0,28428	-1,23179	0,98343	0,39331	1,64151	-5,85818
IN-502	0,72526	-0,86158	-0,14727	-0,11413	0,18128	-0,25650
IN-503	0,73322	-0,86139	-0,08211	-0,05806	-0,01099	0,09030
IN-504	0,72655	-0,83195	-0,05845	-0,01249	-0,04426	0,08126
IR-848	0,64964	-0,62895	0,04560	0,35200	-0,33283	0,01907
TP1-SC	0,59552	-0,57360	-0,69828	0,34252	-0,13493	0,26898
TP2-SC	0,69014	-0,80665	-0,16800	0,35246	-0,35691	0,04566
AC-AF	0,35675	-0,16679	-0,44270	0,57202	-0,44631	0,12084
BRB-11	0,63026	-0,83702	0,93099	0,09652	-0,45494	0,71938
BRB-17-F	0,50715	-0,63736	0,90285	0,18783	0,05609	0,58982
F02-CPRM 901	0,29419	-0,22472	-1,01022	0,38308	-0,09031	0,70607
FF-IR	0,01098	0,69673	-0,28817	0,39988	-0,40216	-0,17320
IR-854	0,31520	-0,15036	0,30060	0,24948	-0,53683	0,40818
IR-900	0,31906	-0,05856	-0,98296	0,44692	-0,09193	0,52548
IR-902	0,30270	-0,35392	-0,97070	0,37104	0,12674	-0,06766
IU-990	0,64133	-1,07638	0,92568	0,09766	-0,42916	0,60410
OCF	0,07988	0,57223	-0,66968	0,29179	0,15048	-0,11839

Ao se comparar os *loadings* das três primeiras componentes principais das variáveis resultantes das ACPs realizadas para o SAG, SASG e SAG+SASG, é possível notar que há parâmetros em comum (Tabela 20). O cálcio, cloreto, magnésio, sódio, sulfato e estrôncio são comuns na 1ª componente principal nas três abordagens. Para a 2ª componente principal, o isótopo  $^{18}\text{O}$  é o elemento em comum. O flúor está presente na 2ª componente principal no SAG e na análise integrada, e na 3ª componente principal da análise realizada no SASG.

Tabela 20. Comparação entre os *loadings* das variáveis das três primeiras componentes principais resultantes das ACPs realizadas para o SAG, SASG e SAG+SASG.

SAG		
Fator 1	Fator 2	Fator 3
pH	Alcalinidade Total	P
Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	
Cl <sup>-</sup>	B <sup>-</sup>	
Mg <sup>2+</sup>	<sup>18</sup> O	
K <sup>+</sup>		
Na <sup>+</sup>		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
SASG		
Fator 1	Fator 2	Fator 3
Ca <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Fe total
Cl <sup>-</sup>	<sup>18</sup> O	F <sup>-</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
<sup>2</sup> H		
SAG + SASG		
Fator 1	Fator 2	Fator 3
Ca <sup>2+</sup>	<sup>18</sup> O	SiO <sub>2</sub>
Cl <sup>-</sup>		
Mg <sup>2+</sup>		
Na <sup>+</sup>		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		

#### 9.6.6. Análise de Agrupamento

Nesta seção pretende-se reagrupar o conjunto de dados (amostras de água do SAG e do SASG) de acordo com seus parâmetros físico-químicos e isotópicos. Utilizaram-se os mesmos parâmetros adotados na ACP, ou seja, temperatura da água, pH, alcalinidade total, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Fe total, Al<sup>3+</sup>, F<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, B<sup>3+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, P<sup>5+</sup>, Sr<sup>2+</sup> e os isótopos estáveis <sup>2</sup>H e <sup>18</sup>O.

Como os dados são de diferentes tipos e grandezas optou-se, à exemplo da ACP, pela padronização das variáveis. A análise de agrupamentos (*Cluster Analysis*) tem a função de caracterizar várias técnicas numéricas para classificar valores de uma matriz de dados em

grupos discretos (LANDIM, 2010). No presente trabalho adotou-se o método por agrupamentos hierárquicos, que é o mais utilizado em estudos geológicos e hidrogeológicos, através da metodologia de variância mínima (*ward's method*). Esse método consiste em obter uma matriz simétrica de similaridade a partir da matriz original.

Esse tipo de metodologia busca detectar pares de casos com a mais alta similaridade ou mais baixa distância (LANDIM, 2003, 2010). Os resultados da análise são organizados em gráficos que mostram as relações entre os grupos encontrados, denominados dendrogramas.

A partir da análise do dendrograma obtido os indivíduos foram separados em quatro grupos hidrogeoquímicos distintos (Figura 71 e Tabela 21).

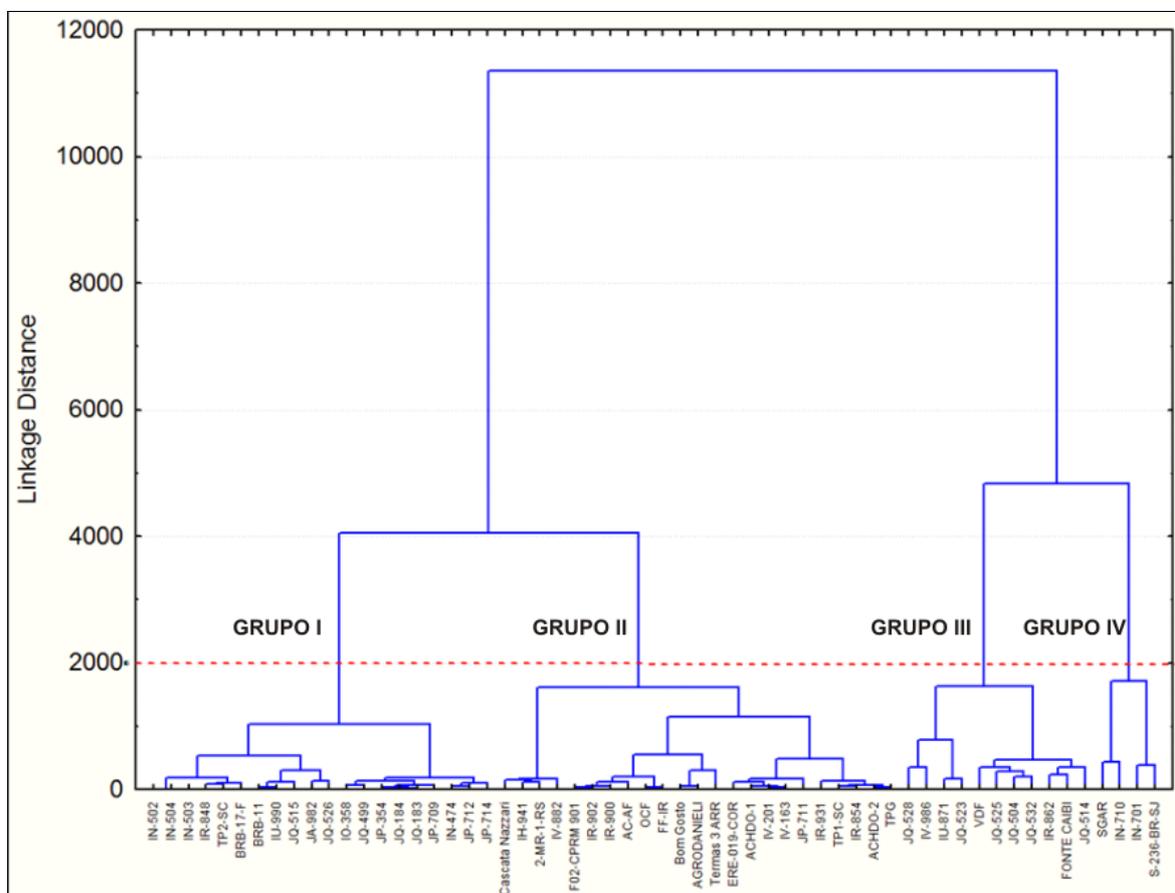


Figura 71. Dendrograma resultante da análise de agrupamento identificando os quatro grupos hidrogeoquímicos para o corte definido.

A distribuição espacial dos grupos hidrogeoquímicos está ilustrada pela Figura 72 onde se observa que a maioria dos poços do grupo I está afastada do vale do Rio Uruguai, enquanto que os representantes do grupo II tendem a se localizar junto a este. O grupo III está distribuído de forma concentrada ao longo do Rio Uruguai na porção extremo oeste da área. O grupo IV está distribuído de modo mais esparsa na área de estudo.

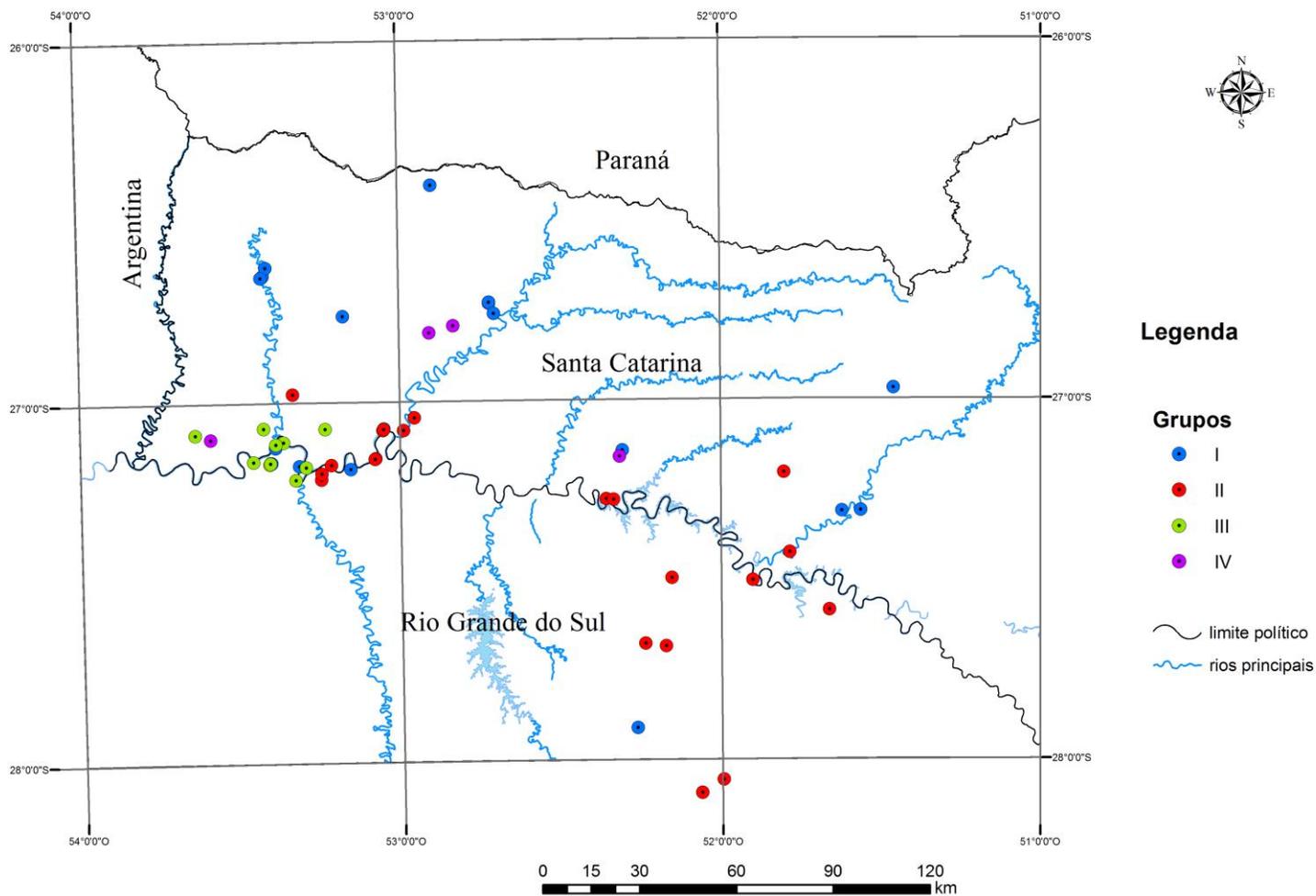


Figura 72. Distribuição espacial dos grupos hidrogeoquímicos obtidos na análise de agrupamento.

Tabela 21. Estatísticas dos principais parâmetros físico-químicos nos grupos derivados da análise de agrupamento.

		Temp. (°C)	pH	Alcal. Total	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Dureza Total	F <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	STD	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<sup>2</sup> H	<sup>18</sup> O	<sup>13</sup> C
GRUPO I	mínimo	18,00	6,98	58,40	8,50	0,80	9,00	8,90	2,00	0,15	0,03	0,01	14,60	139,00	6,40	-41,05	-6,85	-16,76
	máximo	57,00	9,60	181,20	182,20	108,20	160,00	245,20	346,00	2,11	26,70	2,00	53,30	899,00	318,00	-29,67	-5,23	-7,94
	média	29,03	8,76	114,12	105,31	12,64	117,93	60,08	46,63	1,16	3,47	0,13	32,39	397,00	123,25	-36,74	-6,34	-10,98
	mediana	26,60	8,91	118,0	113,90	4,00	122,10	34,20	11,85	1,14	0,02	0,05	29,70	404,00	91,85	-38,24	-6,63	-9,79
GRUPO II	mínimo	20,00	8,17	75,20	60,20	2,40	220,00	49,50	6,00	0,96	0,03	0,01	13,70	660,00	132,50	-44,09	-6,68	-14,27
	máximo	42,30	9,33	596,00	685,80	9,60	460,00	259,00	35,60	6,00	5,27	2,00	47,96	1237,00	494,20	-23,97	-5,69	-3,98
	média	32,99	8,69	263,15	289,62	5,30	324,35	143,89	17,15	2,45	0,92	0,31	19,14	945,09	291,31	-36,85	-6,21	-7,30
	mediana	34,00	8,65	183,80	209,30	4,80	340,00	136,80	17,60	1,85	0,50	0,01	17,30	905,00	318,00	-38,36	-6,23	-7,18
GRUPO III	mínimo	18,00	7,65	17,80	0,50	25,40	98,00	44,00	90,00	1,28	0,05	0,01	18,20	815,00	488,30	-37,58	-6,56	-16,37
	máximo	34,00	9,80	186,90	228,00	204,00	720,00	552,10	580,00	5,33	17,30	5,00	41,20	2572,00	1206,90	-28,63	-5,53	-6,62
	média	24,55	8,38	92,29	108,52	94,24	436,18	294,93	264,98	2,78	7,62	1,82	29,26	1737,45	869,05	-34,66	-6,02	-9,97
	mediana	23,00	8,10	121,80	148,50	82,50	500,00	288,30	221,80	2,52	8,19	0,01	28,20	1827,00	884,70	-35,05	-5,97	-9,03
GRUPO IV	mínimo	19,00	7,40	8,90	10,80	273,80	400,00	1114,0	800,00	0,75	7,41	0,01	10,10	2440,00	665,30	-34,35	-6,39	-17,08
	máximo	53,00	8,30	58,40	71,20	757,90	940,00	1544,0	1921,6	2,60	63,30	13,0 0	39,40	3484,00	1658,30	-24,16	-5,98	-4,86
	média	27,75	7,92	27,98	33,48	534,70	720,00	1373,0	1447,0	1,70	27,45	4,50	23,50	2832,75	1125,33	-29,96	-6,19	-10,97
	mediana	19,50	7,99	22,30	25,95	553,55	770,00	1416,95	1533,15	1,73	28,05	2,50	30,45	2703,50	1018,05	-30,66	-6,20	-10,97

## 9.7. HIDROGEOQUÍMICA E CARACTERÍSTICAS ISOTÓPICAS DOS POÇOS ANALISADOS

### 9.7.1. Introdução

Este capítulo visa identificar o comportamento hidrogeoquímico dos grupos determinados na análise multivariada e interpretar os processos hidrogeoquímicos envolvidos, a origem das águas, relação com as rochas por onde estas circularam e suas características isotópicas. Para tanto foram utilizados diagramas binários clássicos, selecionando os componentes químicos e relações iônicas, cuja origem ou evolução se devem a causas comuns. Tais diagramas em conjunto com o diagrama de Piper permitem tecer deduções sobre os processos hidrogeoquímicos mais prováveis que ocorrem nos sistemas aquíferos.

Estudos de geotermômetros de sílica permitiram obter temperaturas das águas no aquífero, bem como estimar a profundidade máxima de circulação das águas. O modelamento hidrogeoquímico, realizado com o pacote computacional EQ3-6, estabeleceu para as águas analisadas a especiação dos parâmetros principais e as tendências de dissolução e precipitação de minerais.

No final é realizada uma comparação entre as características hidrogeoquímicas das águas e a constituição mineralógica das rochas presentes na área de estudo, especialmente em subsuperfície.

### 9.7.2. Descrição dos Grupos Estatísticos Obtidos na Análise de Agrupamento

O grupo I é formado por 20 poços sendo 14 pertencentes ao SASG e 6 ao SAG (Tabela 22). Destacam-se os poços mais profundos da área de estudo que captam o SAG, localizados em São Lourenço do Oeste (JP-714) e Maravilha (JP-712), no Estado de Santa Catarina.

Tabela 22. Poços do Grupo I .

Sigla	Município	Aquífero	Profundidade (m)	cota (m)	Nível Potenciométrico (m)	temperatura (°C)	Tipo Hidroquímico
JQ-515	Vicente Dutra-RS	SASG	100	212	206.2	21	Na-SO4-HCO3-Cl
JQ-526	Vicente Dutra-RS	SASG	100	203	203	21.9	Na-SO4-Cl-HCO3
JA-982	Alpestre-RS	SASG	137	250	222.4	20.2	Ca-Na-Cl-SO4
IN-502	Quilombo-SC	SASG	52	382	386	37	Na-Cl-SO4-HCO3
IN-503	Quilombo-SC	SASG	48.5	388	-	33	Na-Cl-HCO3-SO4
IN-504	Quilombo-SC	SASG	63	388	-	32	Na-Cl-HCO3-SO4
IR-848	São Carlos-SC	SASG	34	240	240	26	Na-SO4-Cl-HCO3
TP2-SC	São Carlos-SC	SASG	174	229	229	29	Na-SO4-Cl-HCO3
BRB-11	Barra Bonita-SC	SASG	104	301	-	23	Na-SO4
BRB-17-	Barra Bonita-SC	SASG	Fonte	320	320	24	Na-SO4-HCO3
IU-990	Barra Bonita-SC	SASG	132	369	-	22	Na-SO4
IO-358	Estação-RS	SASG		704	-	20.3	Mg-Ca-HCO3
JQ-499	Vicente Dutra-RS	SASG	85.5	220	202.74	22	Na-Ca-HCO3
IN-474	Quilombo-SC	SASG	Fonte	359	359	22	Na-HCO3-Cl-SO4
JP-354	Treze Tílias-SC	SAG	597	850	672.7	27.2	Na-HCO3-CO3
JP-709	Seara-SC	SAG	588	479	318	30	Na-HCO3-CO3
JP-712	Maravilha-SC	SAG	1305	571	335.8	50	Na-SO4-CO3
JP-714	São Lourenço do Oeste-SC	SAG	1560	702	523.1	57	Na-CO3-HCO3-Cl
JQ-183	Campos Novos-SC	SAG	296	496	543.7	30	Na-HCO3-CO3-SO4
JQ-184	Ouro-SC	SAG	516	503	573	32.9	Na-HCO3-CO3-SO4

Também estão presentes os poços termais no SASG nos municípios catarinenses de Quilombo e Barra Bonita, onde o tipo hidroquímico predominante é o bicarbonatado sódico e misto.

O grupo II é composto por 23 poços com 12 captando o SAG e 11 o SASG (Tabela 23). Os poços referentes ao SAG são utilizados na maior parte das vezes para

balneário-terapia devido a sua temperatura e qualidade da água. Destacam-se os poços termais do SASG como os de São Carlos, Palmitos e de Águas de Chapecó, em Santa Catarina, e a fonte termal de Iraí, no Rio Grande do Sul. O tipo hidroquímico mais frequente neste grupo é o misto em relação aos ânions, e sódico no tocante aos cátions.

Composto por 11 poços que captam somente o SASG, o grupo III caracteriza-se por apresentar poços com profundidade até 204 metros, localizados em cotas inferiores a 250 metros (Tabela 24). O tipo hidroquímico predominante é o sulfatado sódico.

Tabela 23. Poços do Grupo II.

Sigla	Município	Aquífero	Profundidade (m)	cota (m)	Nível Potencial (m)	temperatura (°C)	Tipo Hidroquímico
2-MR1-RS	Marcelino Ramos-RS	SAG	800	367	637	36.7	Na-HCO <sub>3</sub>
Cascata Nazzari	Erechim-RS	SAG	870	624	518	35.4	Na-HCO <sub>3</sub> -Cl
IH-941	Machadinho-RS	SAG	983	720	560.5	42	Na-HCO <sub>3</sub>
IV-882	Piratuba-SC	SAG	700	441	573	38	Na-HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub>
Termas 3 ARR	Três Arroios-RS	SAG	1000	536	375.9	32	Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl
AC-AF	Águas de Chapecó-SC	SASG	fonte	258	258	22	Na-SO <sub>4</sub> -Cl-HCO <sub>3</sub>
AGRO DANIELI	Tapejara-RS	SAG	968	617	523.8	41.2	Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
Bom Gosto	Tapejara-RS	SAG	654	654	486	42.3	Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>
F02-CPRM 901	Palmitos-SC	SASG	fonte	221	221	36	Na-SO <sub>4</sub> -Cl
FF-IR	Iraí-RS	SASG	fonte	213	213	20	Na-SO <sub>4</sub> -Cl-HCO <sub>3</sub>
IR-900	Palmitos-SC	SASG	151	251	-	37	Na-SO <sub>4</sub> -Cl
IR-902	Palmitos-SC	SASG	fonte	230	230	36	Na-SO <sub>4</sub> -Cl-HCO <sub>3</sub>
OCF	Iraí-RS	SASG	fonte	218	218	33	Na-SO <sub>4</sub> -Cl-HCO <sub>3</sub>
ERE-19-COR	Erechim-RS	SAG	929	668	474.4	32.4	Na-Cl-SO <sub>4</sub>
IR-931	Riqueza-SC	SASG	180	252	-	21	Na-SO <sub>4</sub> -Cl

Tabela 23 (continuação)

ACHDO-1	Águas de Chapecó-SC	SASG	-	230	240	31	Na-SO4-Cl-HCO3
ACHDO-2	Águas de Chapecó-SC	SASG	-	230	240	33	Na-SO4-Cl-HCO3
IV-163	Itá-SC	SAG	511.4	463	309.3	30	Na-SO4-HCO3-Cl
IV-201	Itá-SC	SAG	924	469	296.85	29.8	Na-SO4-HCO3-Cl
JP-711	Pres. Castelo Branco-SC	SAG	702	575	518	34	Na-HCO3-SO4-Cl
TP1-SC	São Carlos-SC	SASG	129	239	-	36	Na-SO4-Cl-HCO3
TPG	São Carlos-SC	SAG	852	235	265	38	Na-SO4-Cl
IR-854	Palmitos-SC	SASG	83	205		22	Na-SO4-Cl-HCO3

Tabela 24. Poços do Grupo III.

Sigla	Município	Aquífero	Profundidade (m)	cota (m)	Nível Potenciométrico (m)	temperatura (°C)	Tipo Hidroquímico
IU-871	Mondaí-SC	SASG	97	207	192.65	21	Ca-Na-SO4-Cl
IV-986	São João do Oeste-SC	SASG	124	289	226.8	22	Ca-Na-SO4
JQ-523	Vicente Dutra-RS	SASG	100	249	195	21	Ca-Na-SO4-Cl
JQ-528	Vicente Dutra-RS	SASG	204	208	208	24	Na-Ca-SO4
IR-862	Palmitos-SC	SASG	fonte	202	202	31	Na-SO4-Cl
JQ-504	Vicente Dutra-RS	SASG	-	200	-	34	Na-SO4-Cl
JQ-532	Vicente Dutra-RS	SASG	155	212	-	23	Na-SO4-Cl
VDF	Vicente Dutra-RS	SASG	fonte	200	200	32	Na-SO4-Cl
FORTE CAIBI	Caibi-SC	SASG	fonte	240	240	18	Na-SO4-Cl
JQ-514	Vicente Dutra-RS	SASG	105	200	191	21	Na-SO4-Cl
JQ-525	Vicente Dutra-RS	SASG	114	213	213	23	Na-SO4-Cl

O grupo IV é o que tem menor número de representantes, sendo um deles o poço S-236-BR-SJ que capta o aquífero Rio do Rasto (Pré-SAG) em São João do Oeste e três poços no SASG (Tabela 25), localizados em União do Oeste e Seara, no Estado de Santa Catarina. São águas do tipo cloretadas sódicas e cálcicas com os mais altos teores de sais dissolvidos da área de estudo.

Tabela 25. Poços do Grupo IV.

Sigla	Município	Aquífero	Profundidade (m)	cota (m)	Nível Potenciométrico (m)	temperatura (°C)	Tipo Hidroquímico
IN-710	União do Oeste	SASG	150	353	353	20	Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub>
SGAR	Seara	SASG	-	448	-	19	Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub>
IN-701	União do Oeste	SASG	210	375	362.2	19	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>
S-236-BR-SJ	São João do Oeste	SAG e Rio do Rasto	1376	305	215.6	53	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub>

De modo geral, observa-se um incremento da condutividade elétrica do grupo I para o grupo IV, bem como das concentrações de cloreto, potássio, sódio, sais dissolvidos, sulfato e estrôncio, enquanto o pH e o carbonato diminuem. Os teores de cálcio e magnésio diminuem do grupo I para o grupo II, mas cresce demasiadamente do grupo III para o IV, com conseqüente aumento da dureza total na água destes dois últimos. Os teores de fluoreto são maiores nos grupos II e III.

Os diagramas de *boxplot* (Figura 73 e Figura 74) para os principais parâmetros em cada grupo ilustra a diferença das águas e sua evolução hidrogeoquímica. As águas do Grupo I são essencialmente bicarbonatadas sódicas com uma boa parcela delas mistas e sulfatadas sódicas. A água do poço IO-358 do SASG possui elevada CE, localizando-se no município de Estação (RS) e é do tipo Mg-Ca-HCO<sub>3</sub>. O grupo II apresenta águas basicamente mistas, por vezes bicarbonatadas e sulfatadas, mas exclusivamente sódicas. Os grupos I e II são similares, porém as águas do segundo grupo apresentam maiores valores em sais dissolvidos, alcalinidade total, cloretos, flúor, potássio, sódio, estrôncio e sulfato.

No grupo III, onde os poços captam somente o SASG, as águas são sulfatadas sódicas a cálcicas. O grupo IV exhibe águas exclusivamente cloretadas sódicas e cálcicas.

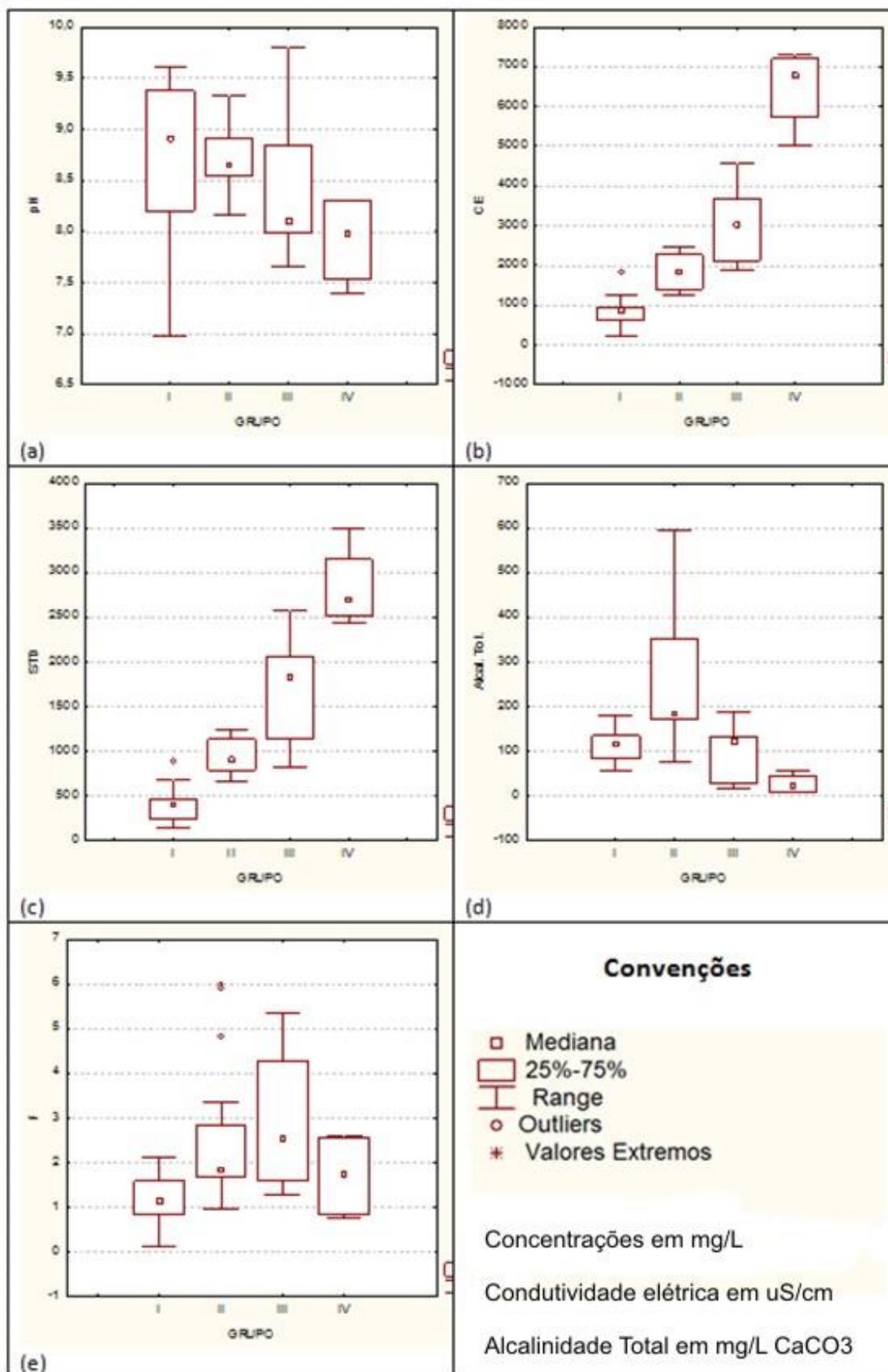


Figura 73. *Boxplots* do pH (a), CE (b), STD (c), Alcalinidade Total (d) e flúor(e) nos quatro grupos hidrogeoquímicos.

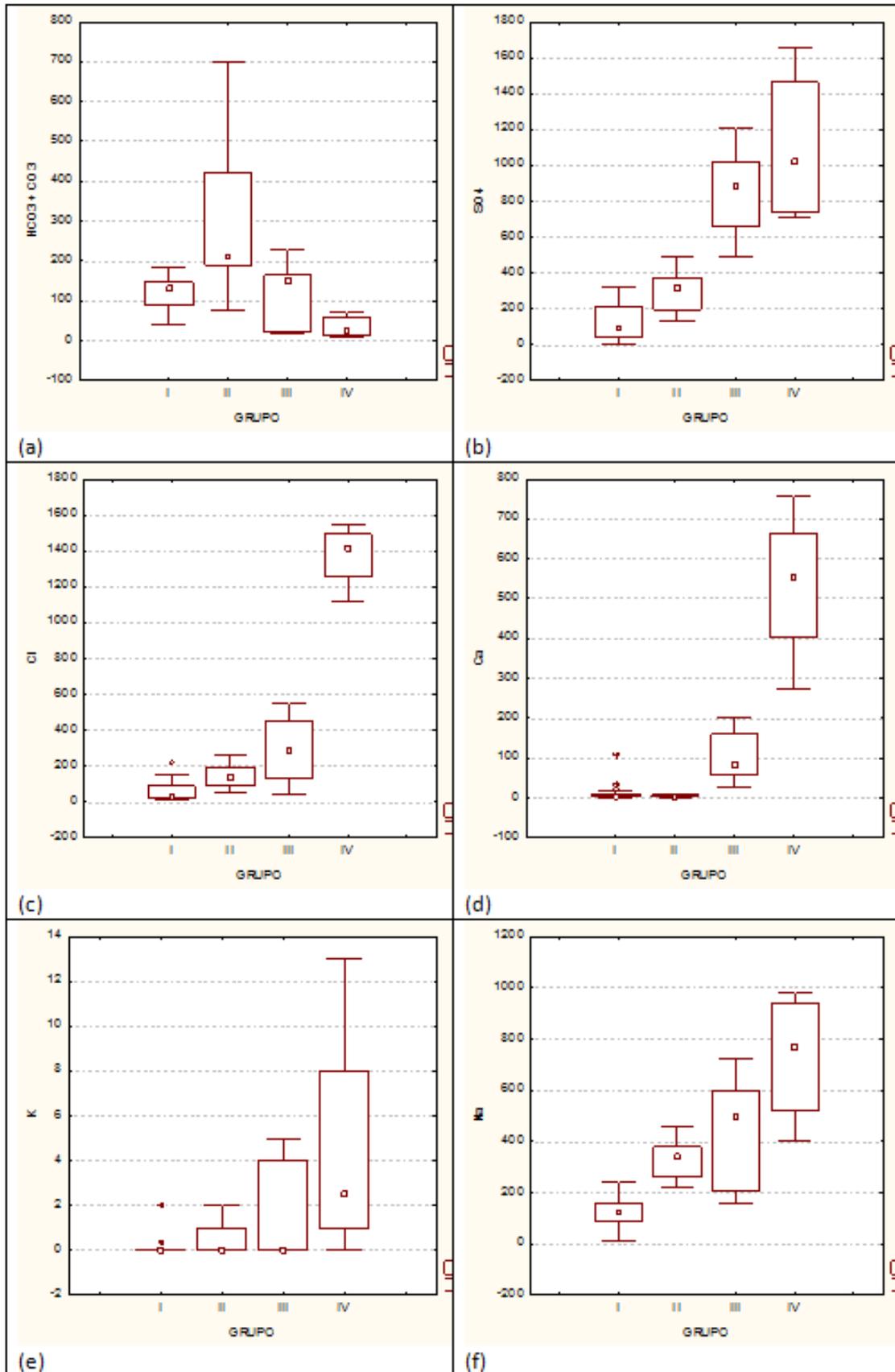


Figura 74. *Boxplots* dos teores de  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  (a),  $\text{SO}_4^{2-}$  (b),  $\text{Cl}^-$  (c),  $\text{Ca}^{2+}$  (d)  $\text{K}^+$ (e) e  $\text{Na}^+$  (f) nos quatro grupos hidrogequímicos.

### 9.7.3. Evolução Hidrogeoquímica

Os tipos hidroquímicos determinados pelo diagrama de Piper (Figura 75) revelam variações na tipologia das águas dos quatro grupos. Do grupo I para o grupo IV, os tipos hidroquímicos variam de bicarbonatados para sulfatados e cloretados, e de sódicos para cálcicos. Esse enriquecimento em cálcio nos grupos III e IV contraria a evolução geoquímica natural das águas, que vão de cálcicas para sódicas.

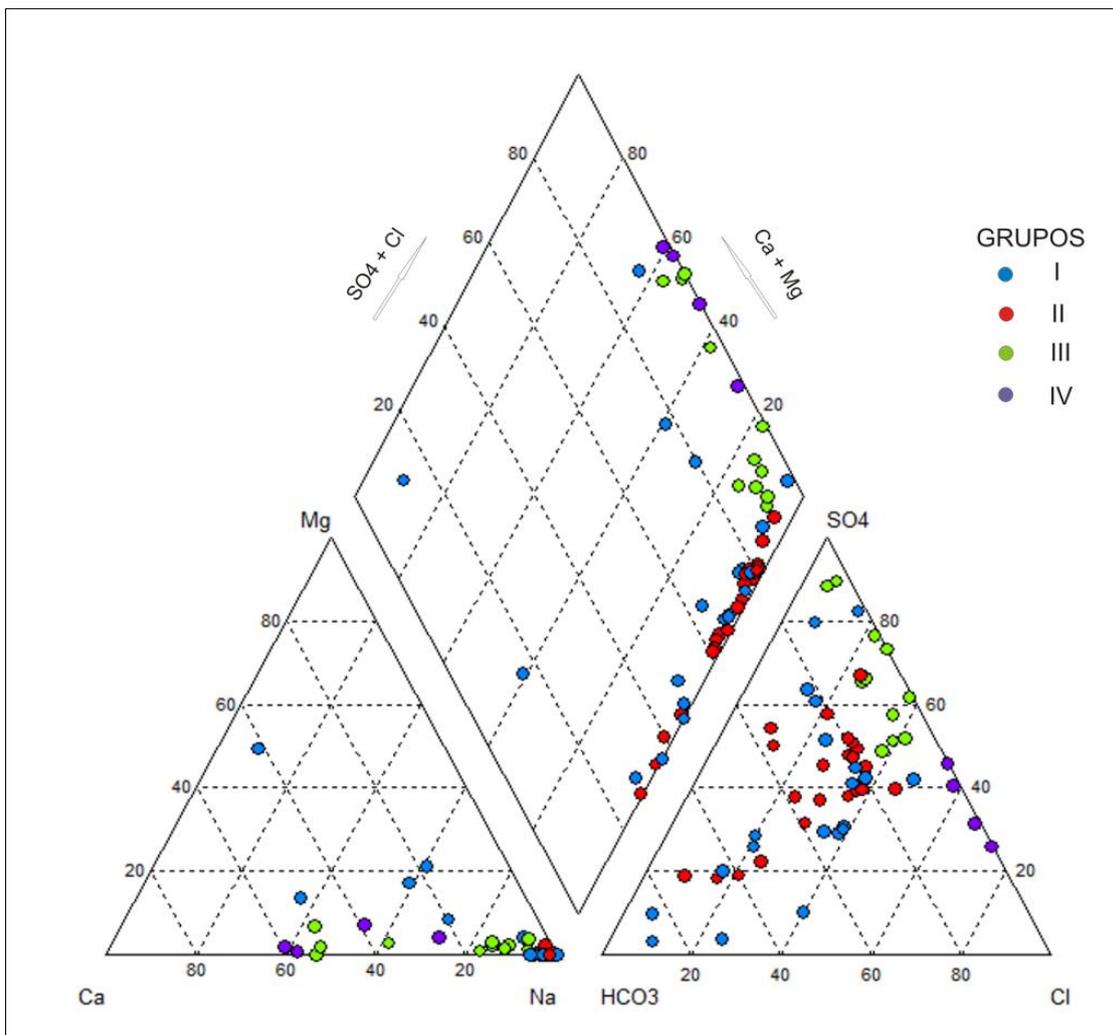


Figura 75. Diagrama de Piper dos grupos hidroquímicos discriminados na análise de agrupamento.

Os diagramas binários entre o total dos sais dissolvidos (STD) em miliequivalente por litro e os principais íons ilustram esse processo (Figura 76). Estes elementos são significativos na ACP realizada, conforme pode ser observado na matriz de *loadings* das componentes principais das variáveis da análise integrada SAG+SASG (Tabela 18).

O grupo I apresenta boa correlação direta entre o STD em meq/L e os teores de sulfato ( $R^2 = 0,77$ ) e cloreto ( $R^2 = 0,70$ ), o que significa que estes elementos estão controlando de forma intensa a salinização das águas. Já no grupo II a evolução hidrogeoquímica é fortemente influenciada pelos teores de sódio, cuja correlação positiva apresenta um  $R^2$  de 0,96. As águas do grupo III possuem elevada correlação entre o sódio e o STD em meq/L ( $R^2 = 0,86$ ), mantendo, também, considerável correlação deste último com o cloreto ( $R^2 = 0,67$ ). O grupo IV tem boa correlação entre o STD em meq/L e os íons sódio, sulfato e cloreto, com  $R^2$  de 0,80, 0,78 e 0,74 %, respectivamente.

As razões iônicas avaliadas para os quatro grupos foram  $rCa^{2+}/rNa^+$ ,  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ ,  $rNa^+/rCl^-$ ,  $rCl^-/rHCO_3^-$  e  $rCl^-/rSO_4^{2-}$ , com concentrações expressas em miliequivalente por litro. Os valores da mediana de cada grupo hidrogeoquímico estão plotados no diagrama de barras da Figura 77 com o objetivo de ilustrar a evolução geoquímica.

Na comparação entre os grupos, o grupo I apresenta uma moderada  $rCa^{2+}/rNa^+$ , baixa  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ , alta  $rNa^+/rCl^-$ , baixa  $rCl^-/rHCO_3^-$  e alta  $rCl^-/rSO_4^{2-}$ . Já o grupo II mostra baixíssima correlação entre  $rCa^{2+}/rNa^+$ , alta  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ , alta  $rNa^+/rCl^-$ , média  $rCl^-/rHCO_3^-$  e média  $rCl^-/rSO_4^{2-}$ . No grupo III as  $rCa^{2+}/rNa^+$ ,  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ ,  $rNa^+/rCl^-$  e  $rCl^-/rHCO_3^-$  são elevadas, enquanto a razão  $rCl^-/rSO_4^{2-}$  é baixa. O Grupo IV caracteriza-se por apresentar uma altíssima razão  $rCa^{2+}/rNa^+$ , média  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ , baixa  $rNa^+/rCl^-$ , altíssima  $rCl^-/rHCO_3^-$  e alta  $rCl^-/rSO_4^{2-}$ .

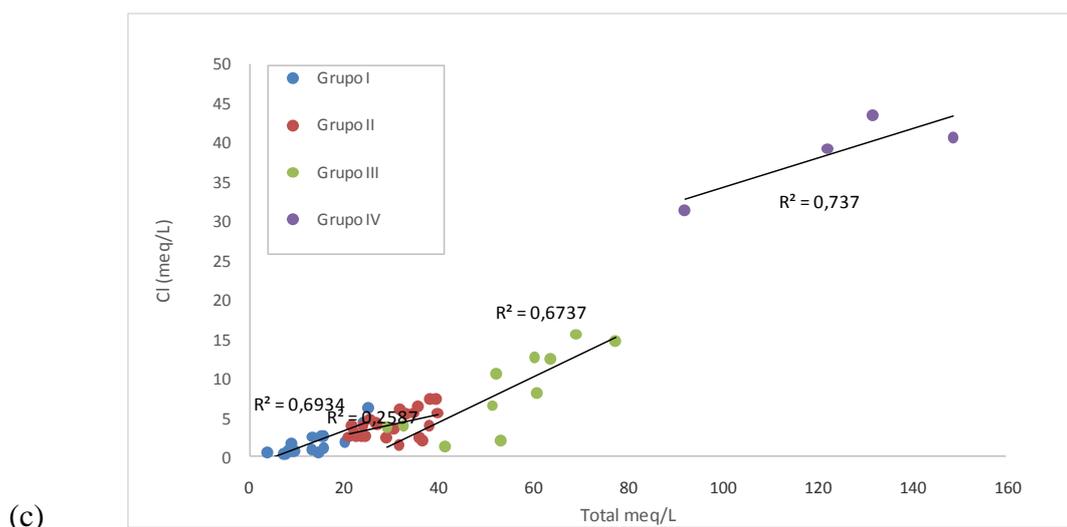
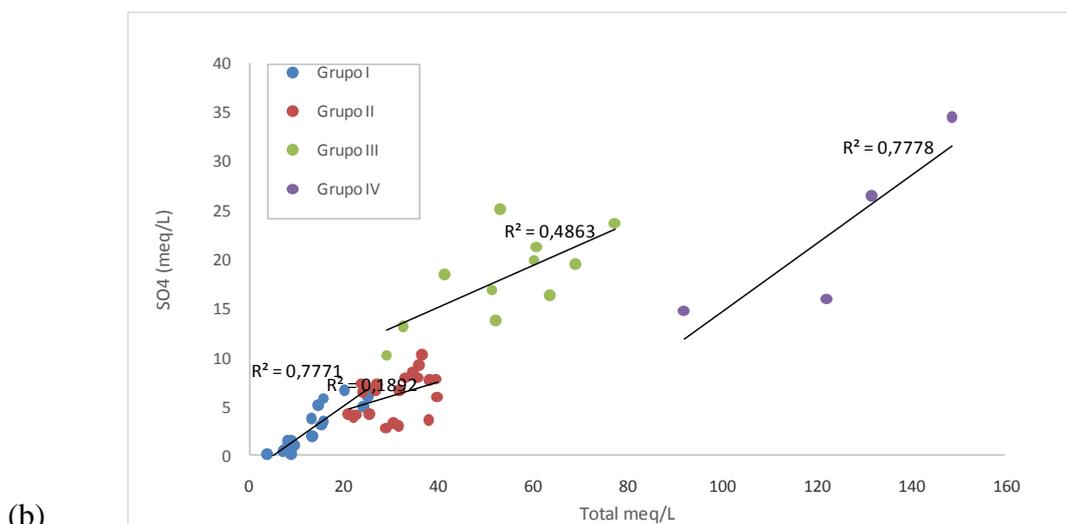
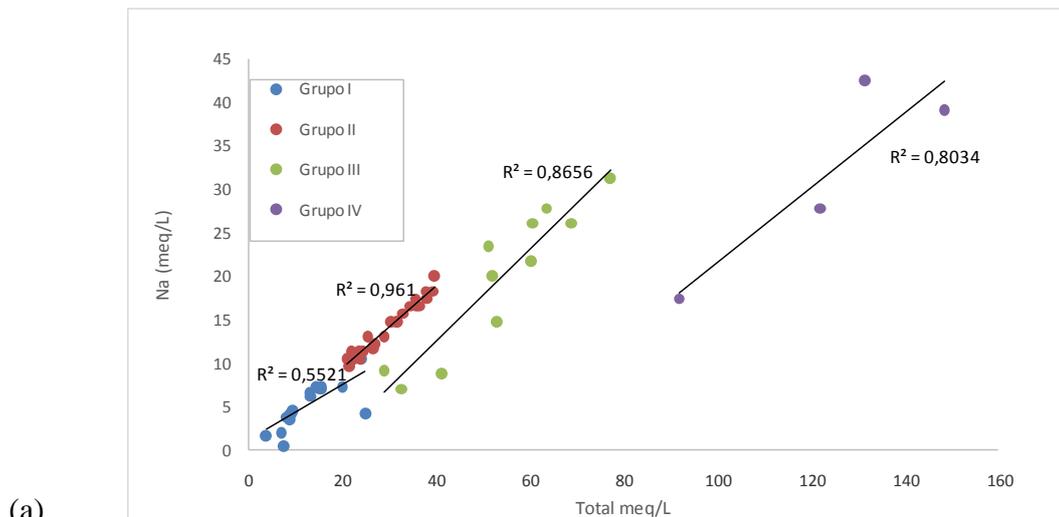


Figura 76. Diagramas binários entre os íons sódio (a), sulfato (b) e cloreto (c) e STD em meq/L. Nota-se que estes elementos são os que contribuem de forma mais significativa para a evolução geoquímica das águas do grupo I para o Grupo IV.

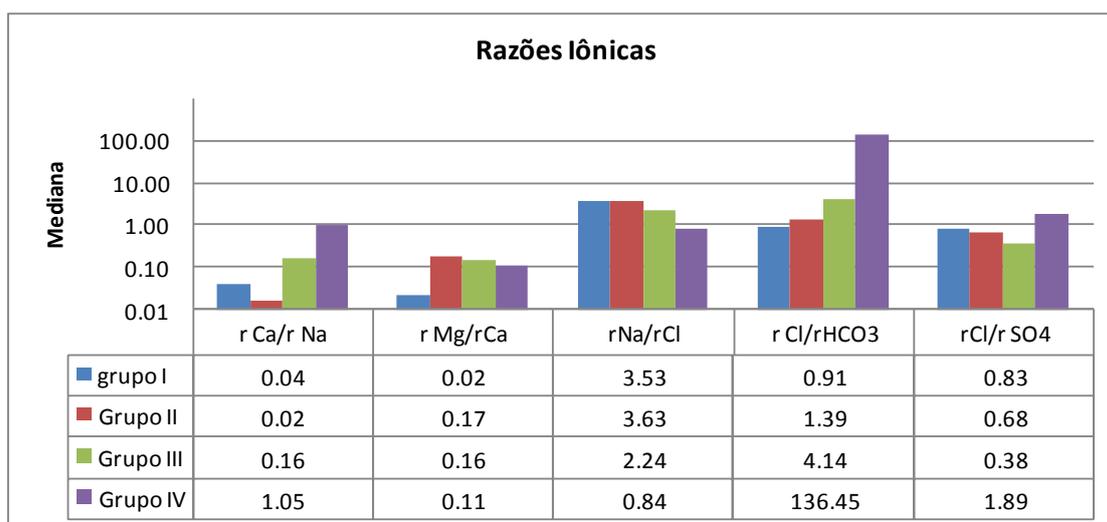


Figura 77. Mediana das razões iônicas em cada grupo hidrogeoquímico.

Com o intuito de estimar a provável origem da água e qual aquífero percolou, adotou-se a metodologia sistematizada por Hounslow (1995). Esta técnica utiliza um balanço de massa simplificado nos resultados analíticos, conforme Garrels e MacKenzie (1967 *apud* Hounslow *op cit.*). Segundo o autor, tal método é bastante efetivo, embora não seja absoluto. O fluxograma desta técnica é apresentado na Figura 78 e considera que a composição inicial de uma água subterrânea originada a partir de precipitação pluviométrica pode ser considerada como água do mar diluída.

Durante seu retorno aos oceanos, a composição da água subterrânea é alterada pelo intemperismo das rochas, evaporação e aeração. Na fase de intemperismo, especialmente os íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{SiO}_2$  são adicionados à água. A quantidade de cada elemento dependerá da mineralogia da rocha e do tempo de residência. Em muitos casos, os minerais da rocha, por onde a água percolou, podem ser deduzidos a partir da composição da mesma (técnica *rock-source-deduction*). Esta técnica é válida para águas com pH acima de 6 e as concentrações dos elementos devem ser convertidas de mg/L para meq/L. Os teores de  $\text{SiO}_2$  devem estar em mmol/L e as análises devem apresentar erro analítico dentro dos padrões aceitáveis.

Seguindo o diagrama referente a técnica denominada *rock-source-deduction*, a fonte primária de cloreto na água está relacionada ao NaCl derivado da dissolução de halita ou indiretamente do oceano via precipitação pluviométrica. Por outro lado, o sódio pode ser derivado de outras fontes, como a dissolução de plagioclásio albitico ou de troca catiônica com argilo-minerais, zeólitas e matéria orgânica, entre outros. Se o

cloreto for maior que o sódio em águas com STD > 500 mg/L, a água é derivada de salmouras, onde a troca iônica é inversa ou ocorre abrandamento natural reverso.

A reação a seguir ilustra o processo acima descrito:



Uma igualdade entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  indica dissolução de halita. Se o sódio for maior que o cloreto a fonte de sódio pode ser outra, além da dissolução de halita, como o intemperismo de plagioclásio ou abrandamento natural, conforme reação abaixo:



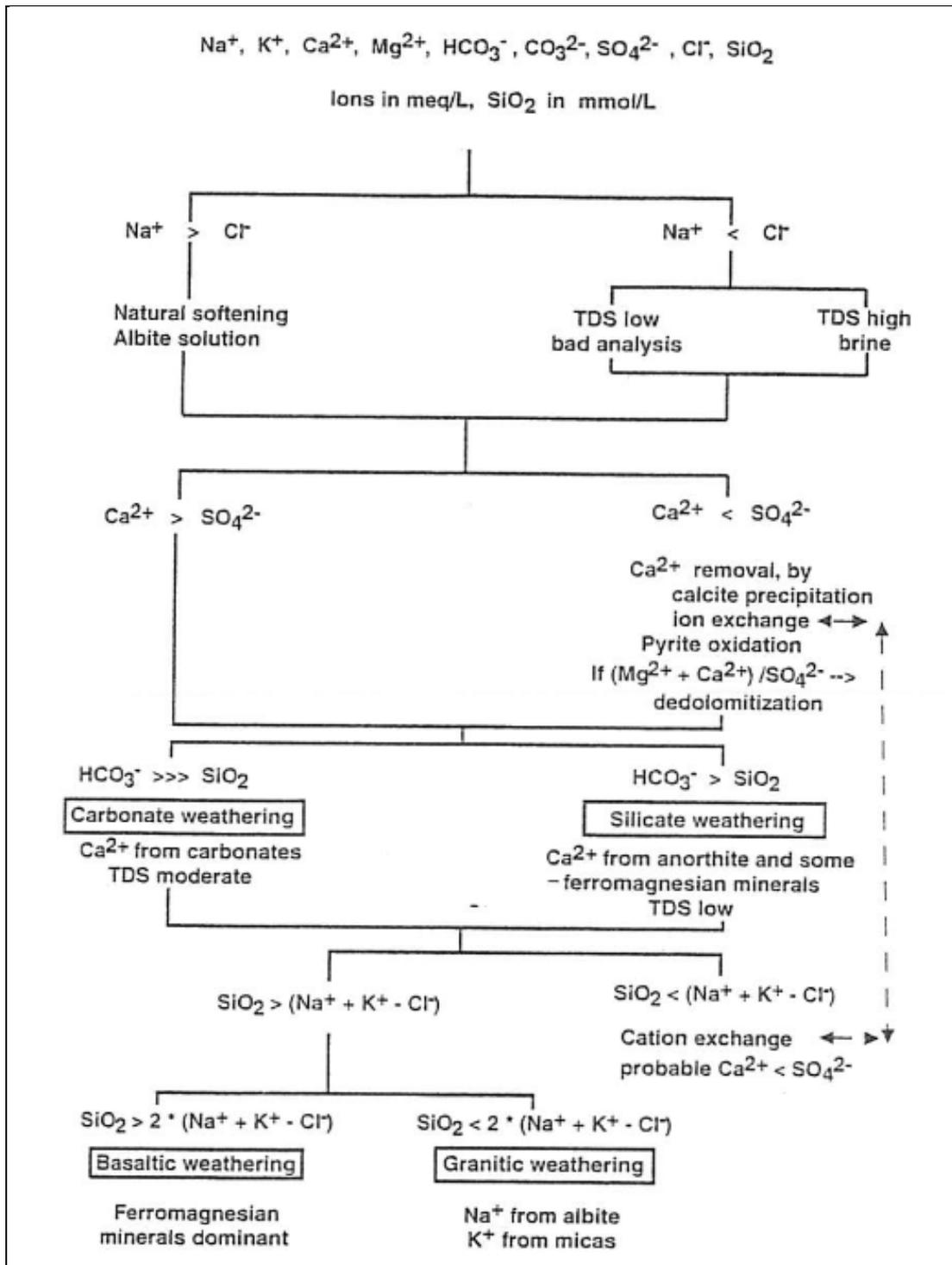


Figura 78. Fluxograma da técnica da interpretação da qualidade da água para determinação do balanço de massa simplificado (adaptado de Hounslow, 1995).

O diagrama que representa a razão  $\text{Na}^+ / \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$  e a quantidade de sais totais dissolvidos em miliequivalente por litro, aqui denominada total em meq/L (Figura 79), sugere que as águas dos grupos I, II e III sofreram processos de troca catiônica e/ ou

dissolução de albita. As águas do grupo IV estão influenciadas por processos de troca iônica inversa ou abrandamento natural reverso.

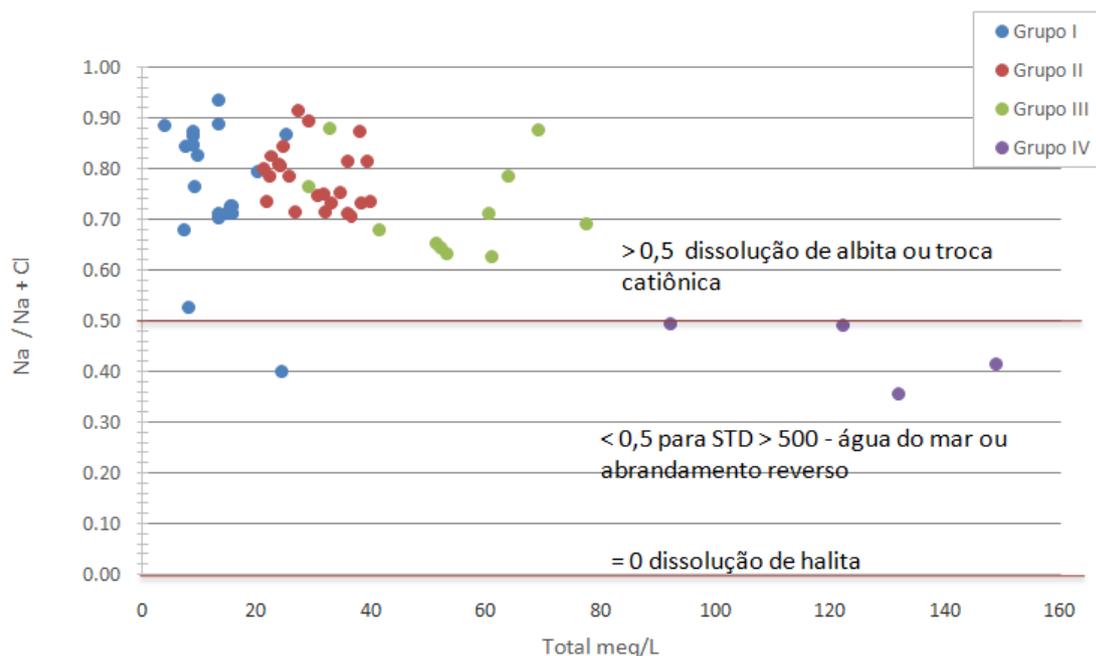


Figura 79. Diagrama entre a relação  $\text{Na}^+ / \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$  e o total em meq/L para os grupos hidrogeoquímicos estatisticamente estabelecidos.

A relação entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (Figura 80) mostra que os grupos I, II, III possuem excesso de sódio em relação ao cloreto, confirmando que o sódio excedente provém da troca catiônica ou da dissolução de plagioclásio. Com exceção do poço JA-982, no grupo I, o sódio e o cloreto não dependem um do outro. No grupo II a situação é semelhante embora menos acentuada.

A troca catiônica pode estar relacionada com os argilominerais presentes nas rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Ramos e Formoso (1975), relatam que os argilominerais mais comuns na Formação Teresina são a ilita, esmectitas e clorita, enquanto na Formação Irati são ilita, camada mista ilita-montmorilonita e clorita.

O aporte de cálcio nas águas com maior salinidade pode ser explicado pela presença de carbonatos, que estão sendo intemperizados e dissolvidos, presentes especialmente nas formações Teresina, Serra Alta e Irati.

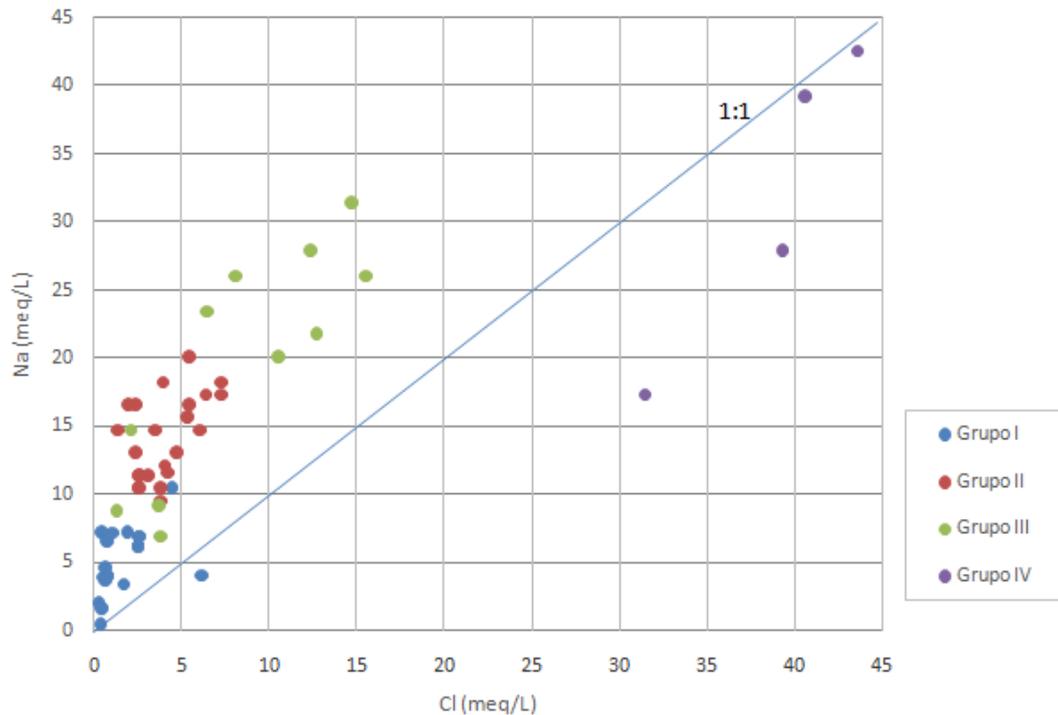


Figura 80. Relação entre Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> nas águas da área de estudo.

O sulfato presente nas águas subterrâneas é geralmente derivado da dissolução direta da gipsita, da anidrita ou da neutralização de águas ácidas por calcário ou dolomita (HOUNSLOW, 1995). Neste último caso, o magnésio deve estar presente, porém, as águas subterrâneas em estudo são moderadamente alcalinas a alcalinas, o que determina que o processo de neutralização não ocorre.

Se a concentração de sulfato for maior que de cálcio, então é provável que o cálcio foi removido da solução por precipitação de calcita ou por reações de troca catiônica. Se os teores de cálcio e sulfato forem idênticos há dissolução de gipsita ou anidrita. Caso a concentração de cálcio for superior a de sulfato, a fonte de cálcio é outra que não a dissolução de gipsita, tendo origem na calcita, dolomita, ou mesmo, intemperismo de silicatos.

O diagrama de Ca<sup>2+</sup> vs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Figura 81) indica que as águas do grupo I, em sua maioria, apresentam maior concentração de sulfato que o cálcio com exceção dos poços IO-58 e JQ-499 que captam o SASG e provavelmente têm influência de calcita presente em brechas e zonas amigdaloides. Os poços que estão sobre a linha de dissolução da gipsita são o JA-982 (SASG) e os poços que captam SAG JP-709 e JP-714, de Seara e São Lourenço do Oeste, respectivamente.

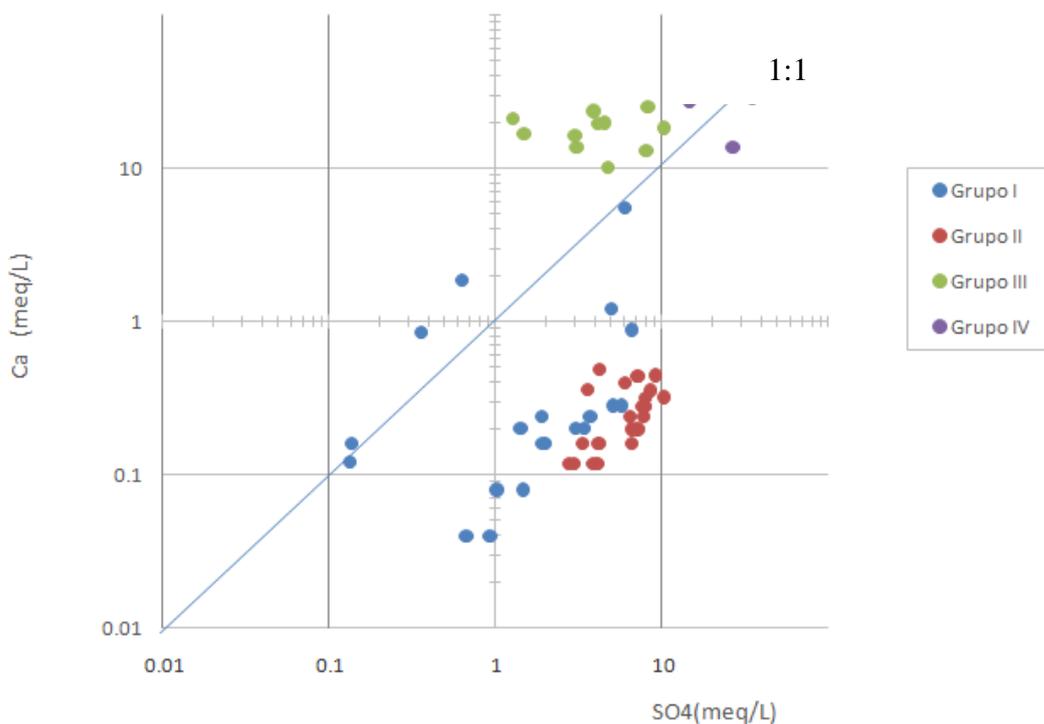


Figura 81. Diagrama binário  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{SO}_4^{2-}$  e a linha de dissolução de gipsita.

Todas as águas do grupo II apresentam maiores teores de sulfato que cálcio, decorrente da precipitação de calcita ou troca catiônica. No grupo III, ao contrário, o cálcio supera o sulfato, indicando dissolução de carbonatos ou alteração de plagioclásio. No grupo IV o poço S236-BR-SJ, que capta preferencialmente o aquífero Rio do Rasto, e o poço IN-701 que capta o SASG anômalo, estão próximos da linha de dissolução da gipsita, mas apresentam maior concentração de sulfato. Já os demais poços desse grupo são pouco mais ricos em cálcio.

O bicarbonato é formado a partir da reação entre dióxido de carbono e minerais, em processo denominado hidrólise ácida. Os carbonatos são dissolvidos sem liberar sílica, enquanto plagioclásios liberam quantidade considerável de sílica, em maior grau que outros silicatos, quando alterados. Hounslow (1995) sugere que a razão  $\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2 < 5$  pode ser utilizada para inferir que ocorre intemperismo de silicatos e em valores  $> 10$  indica dissolução de carbonatos.

Observando os quatro grupos de água plotados no diagrama  $\text{rHCO}_3^-/\text{SiO}_2$  vs STD em meq/L (Figura 82), é possível verificar que a maioria das amostras do grupo II sofrem processos de intemperismo de carbonatos, enquanto os demais grupos apresentam comportamento ambíguo ou decorrente do intemperismo de silicatos.

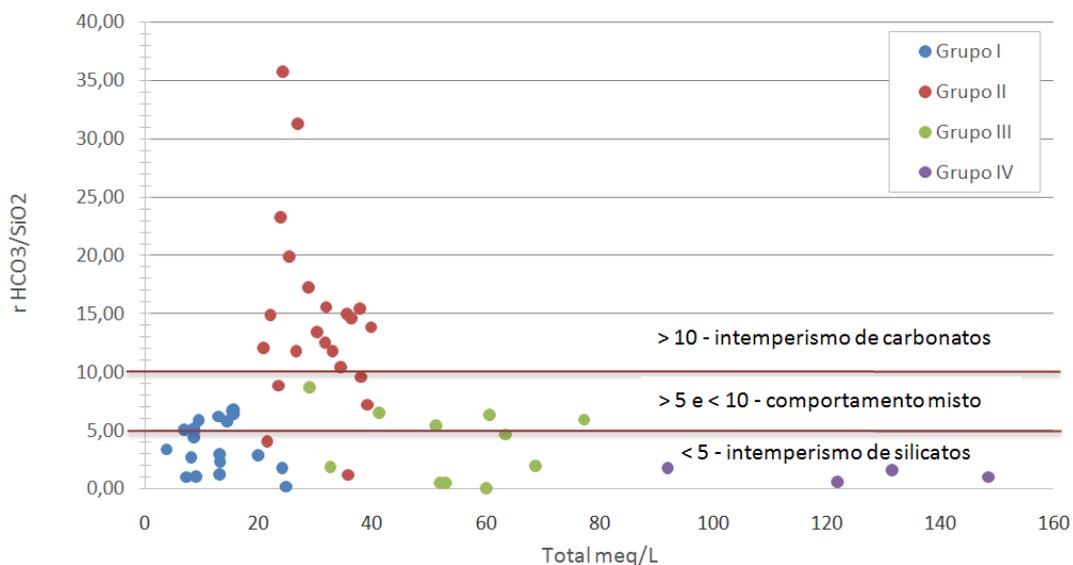


Figura 82. Diagrama  $r\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2$  vs STD em meq/L.

Após a subtração do cloreto do sódio, o sódio remanescente é devido ao intemperismo do plagioclásio (albita) ou devido à troca catiônica. O potássio é predominantemente derivado do intemperismo de biotita ou do feldspato potássico. Se outros minerais ferromagnesianos estiverem presentes, a sílica estará presente em considerável excesso em relação ao sódio menos potássio. Durante o processo de intemperismo o Si é liberado, sendo parte mobilizado e outra parte precipitado sob a forma de gel de silício ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), que apresenta solubilidade ainda maior. Teoricamente as águas teriam os teores de Si incrementados com o aumento do tempo de residência.

Se os teores de  $\text{SiO}_2$  foram menores que a relação  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ , provavelmente a troca catiônica responde pelo excesso de sódio na água. Neste caso, é provável que a concentração de cálcio seja menor que a de sulfato, se carbonatos estiverem ausentes. No caso inverso, ou seja,  $\text{SiO}_2 < (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$  e  $< 2 * (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ , então o intemperismo de albita é provável e como resultado tem-se a presença de argilominerais do tipo caulinita e montmorilonita. Se a  $\text{SiO}_2 > 2 * (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ , então as rochas submetidas ao intemperismo contém uma quantidade considerável de minerais ferromagnesianos (olivina, piroxênio, anfibólio e biotita). Sob tais condições, a fonte maior de cálcio é provavelmente o plagioclásio (anortita). O diagrama da Figura 83 sugere que todos os grupos sofreram processos de troca catiônica.

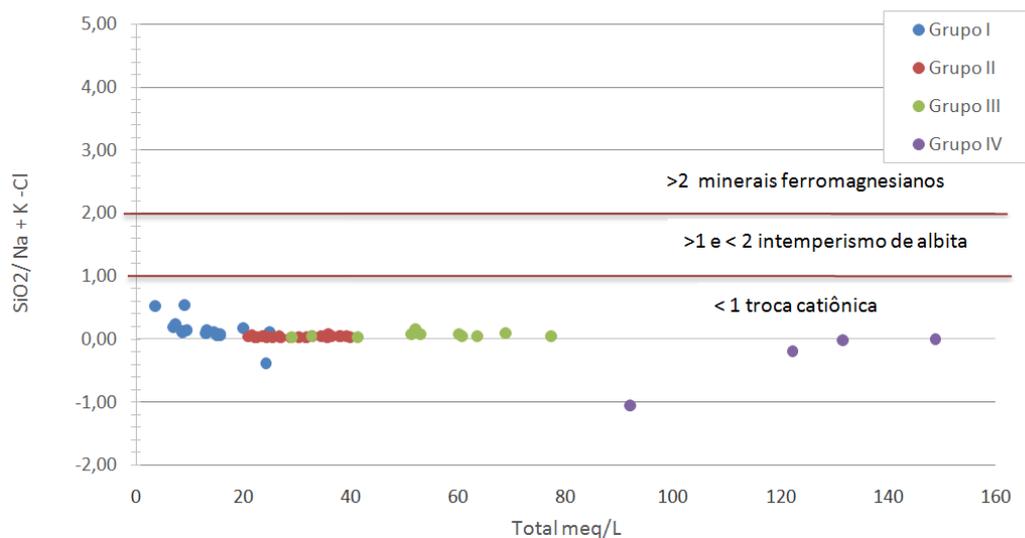


Figura 83. Diagrama da razão  $\text{SiO}_2 / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$  vs STD (meq/L).

Estudos da razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$ , associadas a teores de cloretos, têm sido muito difundidos na Espanha, Portugal, Austrália, Canadá e EUA e são calcados no entendimento que nem toda salinidade da água subterrânea está associada ao aerossol marinho, podendo ser influenciada pelas litologias, precipitação atmosférica e pelo uso antrópico (GOMES *et al.*, 2013).

As razões  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  podem indicar cenários distintos de origem das águas subterrâneas, já que tais íons, uma vez dissolvidos, preservam razoável memória da composição do material responsável pela salinidade na água subterrânea (ALCALÁ e CUSTÓDIO, 2008 *apud* GOMES *et al.*, 2013). Os íons cloreto e brometo dissolvidos em água apresentam um comportamento próximo ao de traçador ideal (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1996), devido a seu caráter hidrófilo e pequeno raio iônico. De acordo com Davis *et al.* (1998), a diversidade entre as concentrações de cloreto e brometo no ambiente apresenta uma diferença primordial tanto na água como nas rochas, sendo o cloro 40 a 80.000 vezes mais abundante do que o bromo. Desta forma, uma pequena mudança na quantidade de  $\text{Br}^-$  dissolvido na água provoca uma substancial diferença na  $r\text{Cl}^-/r\text{Br}^-$ . Segundo os mesmos autores, uma grande parte do cloreto e brometo nas águas subterrâneas é originária da precipitação atmosférica, sendo mais expressiva nas regiões de costa. Também pode ser derivado, entre outros, da dissolução evaporitos, expulsão de salmouras a partir da compactação de argilas e intrusão de água do mar em zonas costeiras.

Outra importante diferença geoquímica entre o cloreto e brometo é a solubilidade relativa de seus compostos. Ambos são muito solúveis, no entanto, os compostos de brometo são muito mais solúveis. Como resultado, no processo de evaporação da água, a halita precipitará primeiro, deixando a água enriquecida em  $\text{Br}^-$ .

A água da chuva normalmente apresenta uma razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  inferior a 650 (DAVIS *et al.*, 1998; ALCALÁ e CUSTÓDIO, 2004; ALCALÁ e CUSTÓDIO, 2008 *apud* GOMES *et al.*, 2013);). Davis *et al.* (1998), em estudos realizados nos aquíferos rasos de Aberta, Kansas e Arizona (EUA), relatam que nas águas de formações que contém halita a  $r\text{Cl}^-/r\text{Br}^-$  variou de 1.000 a 10.000.

Na área de estudo as águas do grupo I apresentaram uma razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  que varia de 352,6 a 1.835,4. Os poços que apresentam as menores razões captam água do SASG, o que pode estar indicando que há mistura de águas mais superficiais decorrentes da precipitação pluviométrica. As águas do grupo II têm razões  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  superiores a 1.000 e inferiores a 2.000. Em somente quatro poços do grupo III houve disponibilidade do resultado analítico do bromo, indicando que nestes indivíduos as razões oscilam entre 1.000 e 2.200. O único poço no qual foi medida a concentração de  $\text{Br}^-$  no grupo IV é o S-236-BR-SJ das termas São João, em São João do Oeste (SC). A razão é 69.687 e indica que há grande influencia de litologias de origem evaporítica. O gráfico da Figura 84 ilustra a  $r\text{Cl}^-/r\text{Br}^-$  vs Cl em mg/L para os quatro grupos de água da área de estudo.

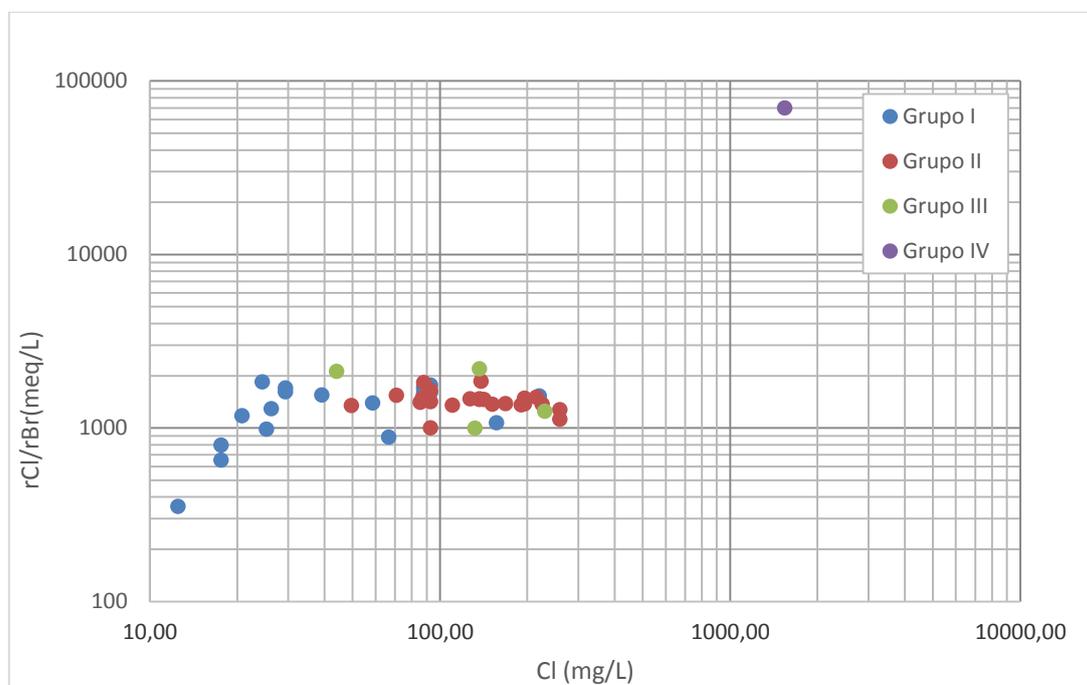


Figura 84. Razão  $\text{Cl}^-/\text{Br}^-$  vs  $\text{Cl}^-$  (mg/L) para os quatro grupos de água da área de estudo.

#### 9.7.4. Cálculo do Índice de Saturação

A interação entre a água subterrânea e as rochas, entre outros fatores, controla a hidrogeoquímica. O cálculo do equilíbrio mineral pode estimar o controle termodinâmico sobre a composição da água subterrânea, que está em equilíbrio com vários minerais (DEUTSCH, 1997). O índice de saturação (IS) foi aplicado para prever a mineralogia das rochas em subsuperfície a partir da amostragem das águas subterrâneas, sem a necessidade de coletar amostras da fase sólida e realizar a análise mineralógica. O IS, calculado pelo pacote computacional EQ3.6, para as 58 amostras de água, é definido como:

$$IS = \log_{10} (IAP/K_{\text{mineral}}) \quad (5)$$

,onde IAP significa o produto de atividade iônica e  $K_{\text{mineral}}$  é a constante de equilíbrio. Quando o  $IS = 0$  o equilíbrio é verificado. A água subterrânea é supersaturada e o  $IS > 0$  e a precipitação se faz necessária para se atingir o equilíbrio. Se o  $IS < 0$ , a água subterrânea é subsaturada e a dissolução é condição para se alcançar o equilíbrio iônico.

O cálculo do equilíbrio mineral para uma amostra de água subterrânea é comumente utilizado para prever a presença de minerais reativos no sistema aquífero e estimar a reatividade mineral (DEUTSCH, 1997). Se a água subterrânea analisada apresenta o IS calculado para alguns minerais reativos próximos a zero, então é provável que tais minerais estejam presentes no sistema aquífero, afetando a composição da solução. O mesmo autor destaca que devido às incertezas inerentes ao cálculo de IS (precisão das análises químicas, equilíbrio mineral constante e método de cálculo das atividades iônicas utilizado), deve-se considerar uma faixa de tolerância de valores de IS próximos a zero para ser delimitada como zona de equilíbrio. Uma faixa de  $IS = \pm 0,5$  e  $0 \pm (5\%) (\log K_{\text{mineral}})$  tem sido adotada em diversos estudos (PACES, 1975 *apud* DEUTSCH, 1997).

A abordagem através do IS permite prever a mineralogia reativa de determinado sistema aquífero, embora a previsão deveria ser validada com a análise da fase sólida. Em muitos casos o mineral reativo não pode ser identificado, porque a concentração está abaixo dos limites de detecção do método analítico. O mineral reativo pode ser produto de intemperismo, que envolve outros grãos ou atua como cimento entre os mesmos, totalizando percentuais muito pequenos em relação ao total da rocha.

De acordo com Deutsch (1997), a solubilidade de um mineral é a quantidade de mineral que se dissolve na água para estabelecer o equilíbrio entre a fase sólida e os componentes em solução. Os fatores que controlam a solubilidade do mineral são a temperatura, pH, Eh e força iônica da solução. As constantes de equilíbrio para todos os minerais são dependentes da temperatura. A maioria dos minerais é mais solúvel a temperaturas mais elevadas, com exceção dos carbonatos que se tornam menos solúveis com o incremento da temperatura.

Os dados de IS determinados pelo programa EQ3.6 para temperaturas de água medidas na boca do poço, por ocasião da coleta, são apresentados na Tabela 26 e indicam para o grupo I (Figura 85) águas não saturadas em relação à gipsita, anidrita, fluorita, halita e, na maior parte dos casos, à sílica amorfa. Os carbonatos (calcita e dolomita) encontram-se em equilíbrio ou supersaturados, com exceção dos poços IO-358 e IN-474 que captam águas do SASG em temperaturas não termiais e estão subsaturados. Tais águas são saturadas em quartzo e calcedônia.

Tabela 26. Índice de Saturação dos minerais calculados para os grupos hidrogeoquímicos.

Grupo	Poço	Anidrita	Aragonita	Calcita	Calcedônia	Dolomita	Fluorita	Gipsita	Halita	Quartzo	SiO <sub>2</sub> (am)
I	JQ-515	-2,05	0,05	0,20	0,72	1,60	-2,38	-1,84	-6,95	1,00	-0,32
	JQ-526	-2,02	-0,20	-0,05	0,69	0,70	-1,71	-1,81	-6,41	0,97	-0,34
	JA-982	-1,39	-0,21	-0,07	0,72	0,44	-0,80	-1,17	-6,26	1,00	-0,32
	IN-502	-3,06	-0,14	0,00	0,00	-0,66	-2,57	-3,00	-6,51	0,26	-0,93
	IN-503	-2,95	0,02	0,17	0,05	-0,51	-2,39	-2,85	-6,50	0,32	-0,91
	IN-504	-3,13	-0,14	-0,05	0,05	-0,68	-2,55	-3,02	-6,50	0,32	-0,91
	IR-848	-2,91	-0,02	0,13	0,06	-0,55	-2,44	-2,74	-6,70	0,33	-0,94
	TP2-SC	-2,86	-0,10	0,05	-0,02	-0,70	-2,48	-2,72	-6,43	0,25	-1,00
	BRB-11	-2,58	-0,20	-0,05	0,64	-1,10	-2,54	-2,38	-7,34	0,92	-0,38
	BRB-17-F	-2,74	-0,17	-0,03	0,60	-0,97	-2,87	-2,56	-7,17	0,87	-0,42
	IU-990	-2,55	-0,45	-0,30	0,54	-1,32	-2,57	-2,34	-6,99	0,81	-0,50
	IO-358	-3,46	-1,03	-0,88	0,77	-0,52	-3,39	-3,28	<i>nd</i>	1,04	-0,27
	JQ-499	-3,17	-0,14	-0,02	0,72	1,03	-2,26	-2,96	<i>nd</i>	0,99	-0,31
	IN-474	-3,18	-1,31	-1,17	0,31	-1,24	-2,71	-2,97	-6,89	0,58	-0,72
	JP-354	-4,30	-0,16	-0,02	0,12	-0,05	-3,56	-4,15	<i>nd</i>	0,40	-0,87
	JP-709	-4,35	0,38	0,52	0,10	0,45	-3,26	-4,22	-7,15	0,37	-0,87
	JP-712	-3,33	-0,09	0,06	0,04	-0,16	-3,42	-3,39	<i>nd</i>	0,29	-0,83
	JP-714	-4,05	0,10	0,24	-0,19	0,10	-4,07	-4,13	<i>nd</i>	0,05	-1,03
	JQ-183	-3,78	0,10	0,24	0,08	0,17	-3,15	-3,65	<i>nd</i>	0,35	-0,90
	JQ-184	-4,14	-0,12	0,02	-0,05	0,09	-3,58	-4,04	<i>nd</i>	0,22	-1,01

Tabela 26 (continuação)

	2-MR-1-RS	-3,24	0,06	0,21	-0,08	1,22	-1,91	-3,18	-6,25	0,18	-1,02
	Casc.Nazzari	-2,69	0,22	0,37	-0,03	1,33	-1,24	-2,61	-5,88	0,23	-0,97
	IH-941	-3,24	0,23	0,37	-0,06	0,30	-1,83	-3,19	-6,43	0,19	-0,97
	IV-882	-3,03	0,14	0,28	-0,01	-0,06	-2,42	-2,98	-6,01	0,25	-0,94
	Termas 3 Ar	-2,48	0,18	0,33	0,14	-0,43	-1,69	-2,37	-5,69	0,40	-0,83
	AC-AF	-2,79	-0,06	0,08	0,10	0,92	-2,37	-2,58	-5,75	0,37	-0,94
	Agrodan	-2,03	0,04	0,18	0,02	1,23	-2,16	-2,23	-6,24	0,29	-0,90
	Bom Gosto	-2,15	0,28	0,43	0,05	1,02	-2,12	-2,14	-6,16	0,31	-0,86
	F2-CPRM901	-2,32	0,13	0,27	-0,10	-0,51	-2,36	-2,25	-5,78	0,15	-1,02
	FF-IR	-2,70	-0,17	-0,03	0,27	1,25	-1,93	-2,47	-5,58	0,55	-0,78
	IR-900	-2,45	0,05	0,20	-0,16	1,03	-2,43	-2,38	-5,70	0,10	-1,06
II	IR-902	-2,39	-0,04	0,09	-0,09	-0,81	-2,39	-2,31	-5,81	0,17	-1,04
	OCF	-2,51	0,04	0,18	0,01	1,75	-2,12	-2,42	-5,63	0,27	-0,95
	ERE19-COR	-2,48	0,60	0,75	0,01	1,97	-2,18	-2,39	-5,92	0,27	-0,96
	IR-931	-2,38	-0,15	-0,01	0,73	0,70	-1,64	-2,14	-6,22	1,05	-0,31
	ACHDO-1	-2,91	0,02	0,16	-0,07	-0,36	-2,53	-2,82	-6,14	0,19	-1,05
	ACHDO-2	-2,75	-0,02	0,12	-0,09	-0,46	-2,59	-2,65	-6,04	0,17	-1,05
	IV-163	-2,97	0,12	0,26	0,00	-0,15	-3,11	-2,84	-6,29	0,28	-0,97
	IV-201	-3,12	0,03	0,18	-0,09	1,11	-2,97	-3,07	-6,15	0,18	-1,08
	JP-711	-3,10	0,16	0,30	0,00	1,70	-3,07	-3,01	-6,28	0,27	-0,95
	TP1-SC	-2,54	0,05	0,20	-0,13	-0,47	-2,41	-2,47	-6,12	0,13	-1,05
	TPG	-2,58	0,01	0,15	-0,15	-0,48	-2,54	-2,53	-6,05	0,11	-1,04
	IR-854	-2,37	0,02	0,17	0,30	0,73	-2,19	-2,17	-6,23	0,58	-0,73
	IU-871	-0,97	0,22	0,37	0,44	-1,44	-0,55	-0,75	-6,29	0,71	-0,60
	IV-986	-0,79	0,27	0,42	0,69	1,09	-1,01	-0,58	-6,70	0,97	-0,33
	JQ-523	-1,23	-0,52	-0,37	0,13	-1,04	-0,08	-1,01	-6,50	0,41	-0,90
	JQ-528	-0,79	0,77	0,92	0,37	1,89	-0,22	-0,60	-6,30	0,64	-0,65
	IR-862	-1,60	-0,09	0,04	0,09	1,15	-1,94	-1,48	-5,45	0,35	-0,88
III	JQ-504	-1,10	-0,02	0,12	0,16	0,58	-1,01	-1,01	-5,18	0,42	-0,81
	JQ-532	-1,39	0,24	0,38	0,46	1,29	-1,18	-1,20	-5,22	0,73	-0,60
	VDF	-1,10	0,02	0,16	0,21	0,63	-1,02	-0,99	-5,13	0,47	-0,77
	F.CAIBI	-1,69	-0,12	0,02	0,70	0,51	-1,81	-1,44	-5,55	0,99	-0,35
	JQ-514	-1,42	0,21	0,36	0,64	1,26	-1,13	-1,20	-5,41	0,92	-0,40
	JQ-525	-1,16	0,14	0,29	0,48	0,60	-0,50	-0,96	-5,35	0,75	-0,54
	IN-710	-0,60	0,16	0,30	0,04	-0,03	-0,02	-0,38	-4,79	0,31	-1,01
IV	SGAR	-0,65	0,01	0,15	0,48	-0,04	-1,19	-0,42	-5,03	0,76	-0,57
	IN-701	-0,41	-0,04	0,10	0,32	0,60	-0,24	-0,18	-4,60	0,60	-0,73
	S236BR-SJ	-0,37	0,06	0,20	0,12	0,77	-1,61	-0,46	-4,60	0,37	-0,77

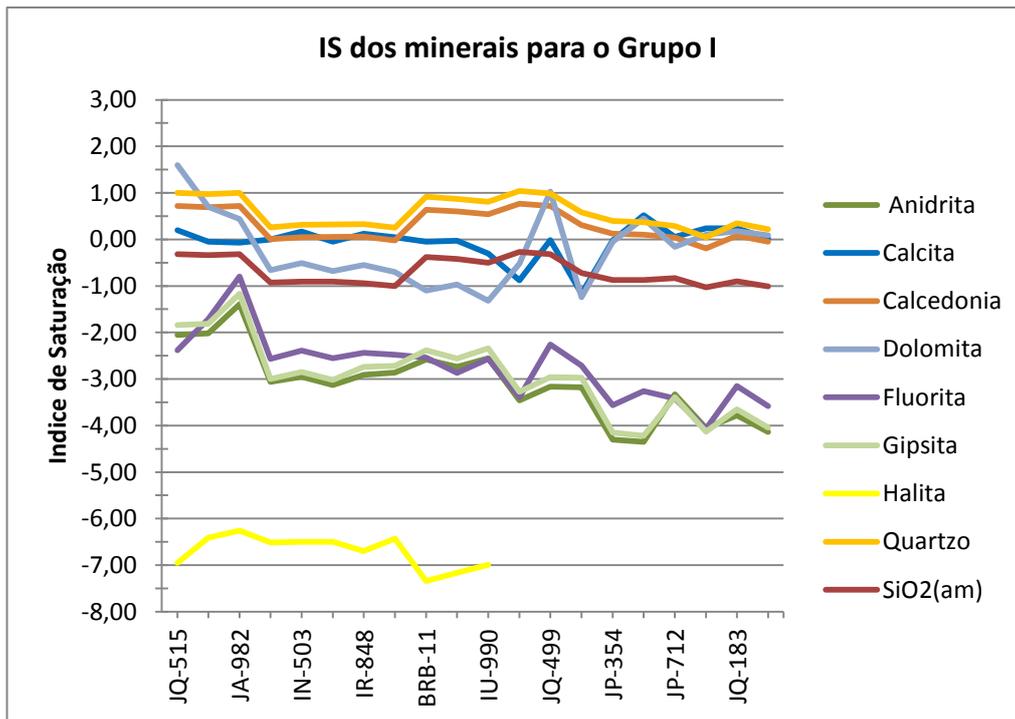


Figura 85. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo I.

No grupo II, as águas nas condições iniciais de temperatura (Figura 86) são insaturadas em gipsita, anidrita, fluorita, halita e sílica amorfa. A calcedônia, quartzo e calcita encontram-se supersaturados ou em equilíbrio. A dolomita mostra comportamento muito variável entre insaturado e saturado.

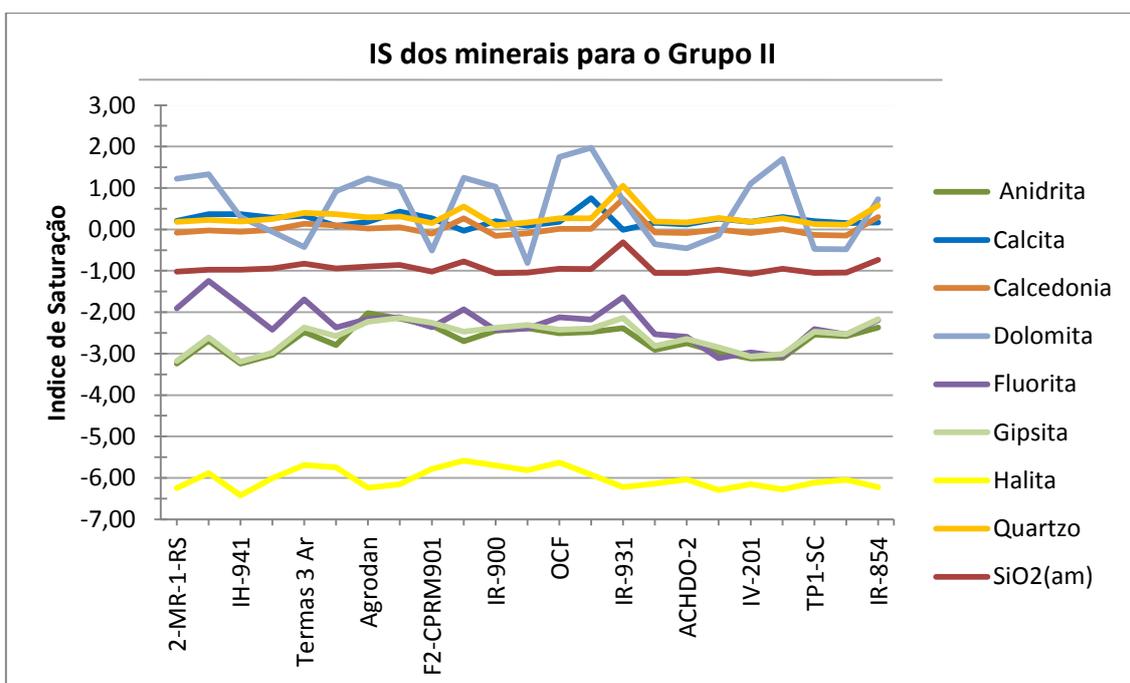


Figura 86. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo II.

O grupo III (Figura 87), composto exclusivamente pelo SASG, exhibe águas supersaturadas em calcita (exceto poço JQ-523), quartzo, calcedônia e dolomita. A sílica amorfa, gipsita, fluorita e anidrita estão insaturadas, mas em um menor grau que os grupos anteriores e com valores próximos a zona de equilíbrio (exceção das fontes IR-862 e Caibi). Cabe ressaltar que os poços JQ-523 e JQ-528 apresentam fluorita na zona de equilíbrio.

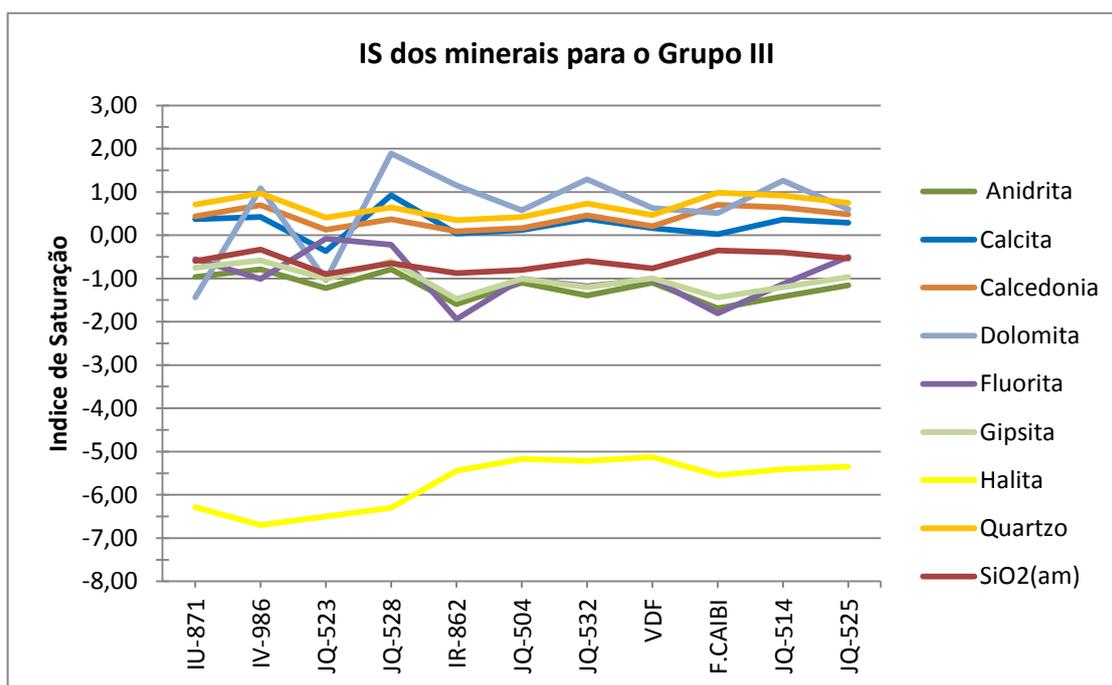


Figura 87. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo III.

O quarto grupo apresenta águas com calcita, calcedônia, quartzo e dolomita supersaturados e anidrita, calcedônia e halita subsaturadas (Figura 88). A fluorita nos poços IN-701 e IN-710, que captam o SASG, tem seu IS junto à zona de equilíbrio e nos demais poços encontra-se insaturada. A gipsita está dentro da zona de equilíbrio mineral.

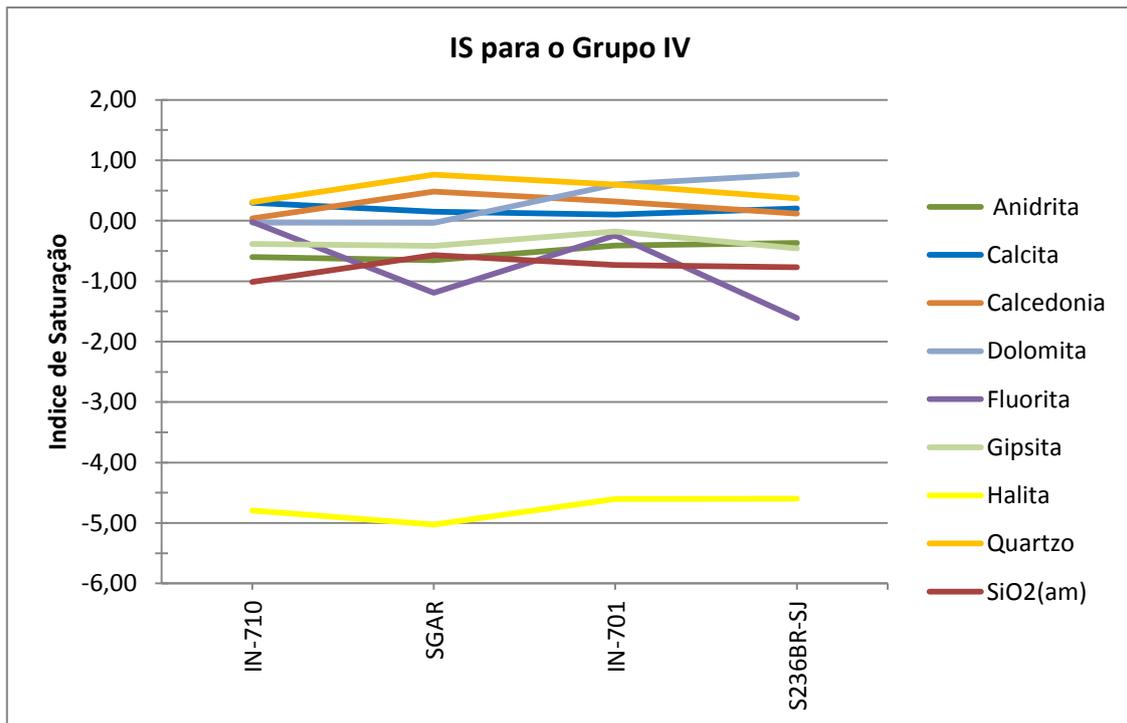
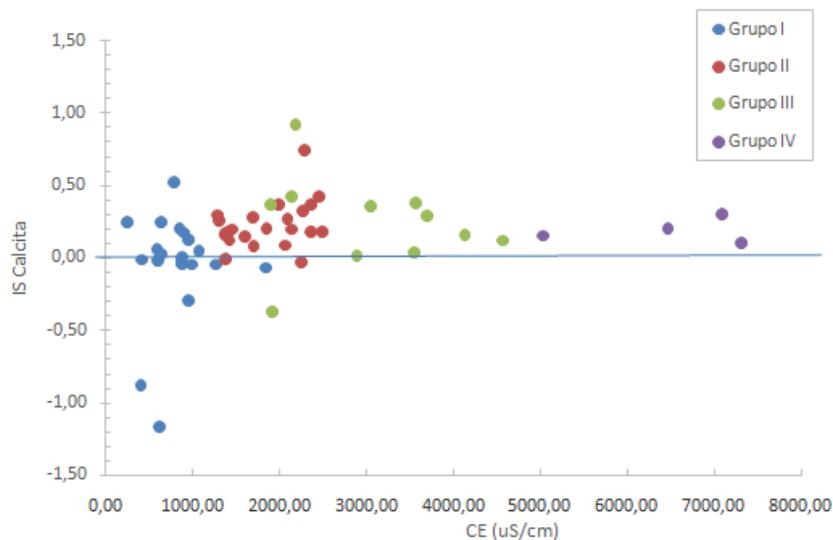
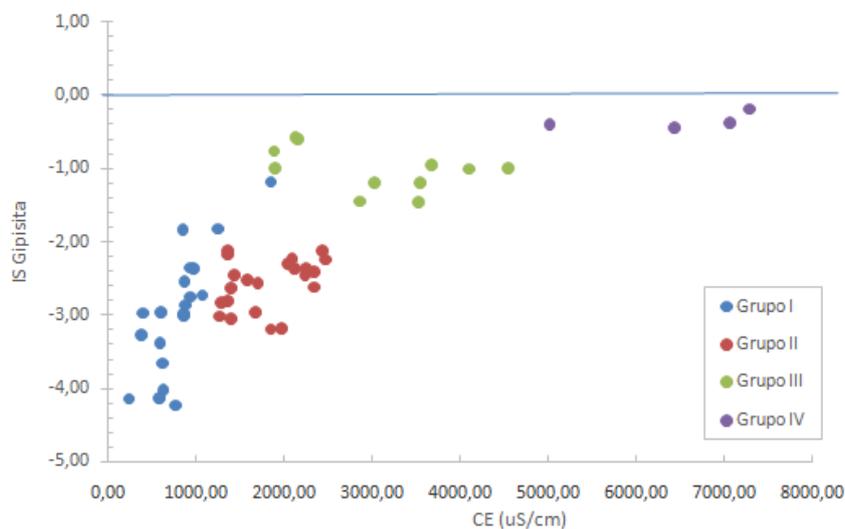


Figura 88. Comparação entre os IS dos diversos minerais do grupo IV.

Os diagramas IS da calcita e gipsita vs condutividade elétrica (Figura 89-a e Figura 89-b) sugerem que a evolução hidrogeoquímica dos grupos se faz no sentido do grupo I para o grupo IV, controlando o comportamento destes minerais. As figuras mostram que há uma tendência da presença de calcita em todos os grupos, enquanto que a gipsita está intensamente condicionada pelo incremento da salinidade, ocorrendo no aquífero a partir do grupo III.



(a)



(b)

Figura 89. Comportamento do índice de saturação vs condutividade elétrica para os grupos hidrogeoquímicos: (a) IS calcita, (b) IS gipsita.

### 9.7.5. Especificação Química da Água de Acordo com o Modelamento Geoquímico

Os cálculos de especificação química das águas nos quatro grupos hidrogeoquímicos foram baseados na média dos percentuais encontrados de cada espécie química, determinados pelo pacote computacional EQ3-6, considerando a temperatura da água no aquífero. A fundamentação teórica dos elementos descritos baseou-se em Hem (1985).

### 9.7.5.1. Cálcio

O cálcio é o metal alcalino terroso mais abundante e é constituinte de várias minerais integrantes das rochas. Este elemento apresenta estado único de oxidação ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e seu comportamento em sistemas naturais aquosos geralmente é regido pela dissolução dos sólidos solúveis portadores de cálcio e pelo equilíbrio entre a fase líquida e a gasosa ( $\text{CO}_2$ ).

No grupo I as espécies de cálcio distribuem-se da seguinte forma: 67,09% de  $\text{Ca}^{2+}$ , 25,51% de  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ , 8,05% de  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$  e 1,67%  $\text{CaHCO}_3^+$ . O grupo II é muito semelhante ao primeiro e as águas compreendem 68,61% de  $\text{Ca}^{2+}$ , 18,01% de  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ , 10,85% de  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$  e 2,55% de  $\text{CaHCO}_3^+$ . As águas do grupo III possuem 70,18% de  $\text{Ca}^{2+}$ , 25,90% de  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ , 3,13% de  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$  e 1,48%  $\text{CaHCO}_3^+$ . No grupo I, V predominam as espécies  $\text{Ca}^{2+}$  (81,00%), 18,17% de  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$  e 0,55% de  $\text{CaHCO}_3^+$ .

Deve-se observar que a proporção de  $\text{Ca}^{2+}$  aumenta nos grupos III e IV em relação às demais espécies e que o  $\text{CaHCO}_3^+$  é substituído pelo  $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ .

### 9.7.5.2. Magnésio

O magnésio é igualmente um metal alcalino terroso que apresenta um único estado de oxidação ( $\text{Mg}^{2+}$ ), tendo como principal fonte os minerais ferro-magnesianos, bem como os carbonatos magnesita, hidromagnesita e dolomita.

Nas águas do grupo I o magnésio é distribuído na seguinte proporção: 64,29% de  $\text{Mg}^{2+}$ , 24,47% de  $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ , 11,40% de  $\text{MgCO}_3(\text{aq})$  e 1,54% de  $\text{MgHCO}_3$ . Para o grupo II as proporções são 61,40% de  $\text{Mg}^{2+}$ , 29,62% de  $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ , 6,42% de  $\text{MgCO}_3(\text{aq})$  e 2,37% de  $\text{MgHCO}_3^+$ . As águas do grupo III apresentam 60,72% de  $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ , 37,99% de  $\text{Mg}^{2+}$ , 0,90% de  $\text{MgHCO}_3^+$  e 0,86% de  $\text{MgCO}_3(\text{aq})$ . No grupo IV, 54,62% das espécies é de  $\text{Mg}^{2+}$ , 44,32% de  $\text{MgSO}_4(\text{aq})$  e 0,86% de  $\text{MgCl}$ .

### 9.7.5.3. Sódio

O sódio é o elemento mais abundante do grupo dos metais alcalinos e, como todos estes, o estado de oxidação é  $1^+$ . A principal fonte de sódio na natureza são os feldspatos, constituintes das principais rochas ígneas e metamórficas, os evaporitos e os processos de troca catiônica envolvendo argilominerais. O sódio diluído em águas com STD menores que 1.000 mg/L está normalmente sob a forma de  $\text{Na}^+$ . Em soluções mais

concentradas outros íons complexos são possíveis como o  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  (aq) e  $\text{NaSO}_4^-$ .

Nas águas do grupo I, 99,03% das espécies são do tipo  $\text{Na}^+$  e 0,99%  $\text{NaSO}_4^-$ . O grupo II também apresenta proporção semelhante, com 98,42% de  $\text{Na}^+$ , 1,14% de  $\text{NaSO}_4^-$  e 0,73% de  $\text{NaHCO}_3$ (aq). A proporção de 97,31% das águas do grupo III apresenta a forma iônica  $\text{Na}^+$ , enquanto que 2,35% refere-se a  $\text{NaSO}_4^-$ . No grupo IV o  $\text{Na}^+$  predomina com 97,52% e o  $\text{NaSO}_4^-$ , 1,95%.

#### **9.7.5.4. Potássio**

Segundo Hem (1985) o potássio é muito menos comum do que o sódio em rochas ígneas, mas muito mais comum em rochas sedimentares. A principal fonte de potássio nas rochas está relacionada com os feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio), micas e feldspatóides. Nos sedimentos o potássio está intimamente relacionado com os feldspatos, partículas de micas, illita ou outros argilominerais. No presente estudo o potássio apresenta-se sob a forma de  $\text{K}^+$ , nos quatro grupos, com cerca de 97,00%, enquanto cerca de 2,50% ocorre sob a forma de  $\text{KSO}_4^-$ .

#### **9.7.5.5. Cloreto**

O cloreto, elemento mais abundante dos halogênios, forma compostos com elementos metálicos comuns, metais alcalinos e alcalino terrosos, muitos solúveis nas águas naturais. Fato significativo que ilustra o comportamento geoquímico do cloreto é que mais de 3/4 do total existente nos vários compartimentos ambientais está em solução nas águas dos oceanos. O cloreto forma pares iônicos ou complexos iônicos com alguns dos cátions presentes nas águas naturais, mas tais complexos não são suficientemente fortes para estarem presentes nas águas doces. Porém são mais frequentes nas águas do mar e em salmouras. Nas águas dos quatro grupos hidrogeoquímicos em estudo o cloreto está presente exclusivamente sob a forma de  $\text{Cl}^-$ .

#### **9.7.5.6. Bicarbonato e Carbonato**

O íon bicarbonato não sofre redução nem oxidação em águas naturais e sua concentração é controlada pelos efeitos do equilíbrio. Nas águas do grupo I as espécies encontradas pelo modelamento hidrogeoquímico e suas proporções são: 95,73% de  $\text{HCO}_3^-$ , 4,95% de  $\text{CO}_2$ (aq), 2,48% de  $\text{CaCO}_3$ (aq), 1,07% de  $\text{CaHCO}_3^+$ , 0,99% de

MgCO<sub>3</sub>(aq) e 0,43% NaHCO<sub>3</sub>(aq). No grupo II a proporção das espécies é de 97,55% de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 1,90% de CaCO<sub>3</sub>(aq), 1,01% de CaHCO<sub>3</sub> e 0,73% de CO<sub>2</sub>(aq). O grupo III tem como distribuição 82,61% de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 15,11% de CaCO<sub>3</sub>(aq), 1,74% de CO<sub>2</sub>(aq), 1,60% de CaHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, 0,57% de MgCO<sub>3</sub>(aq) e 1,06% NaHCO<sub>3</sub>(aq). Nas águas do grupo IV, 82,45% refere-se a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 8,25% de CaCO<sub>3</sub>(aq), 4,85% de CaHCO<sub>3</sub>, 4,07% de CO<sub>2</sub>(aq), 1,52% de NaHCO<sub>3</sub>(aq) e 0,64% de MgCO<sub>3</sub>(aq).

Em todos os grupos hidrogeoquímicos o carbonato está presente exclusivamente sob a forma de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

#### **9.7.5.7. Sulfato**

O sulfato é um íon que possui tendência a formar espécies iônicas complexas nas águas naturais, mais comumente como NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup> e CaSO<sub>4</sub>. Nas águas do grupo I a forma iônica SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> é a predominante (92,45%), tendo ainda MgSO<sub>4</sub>(aq) com 14,29%, CaSO<sub>4</sub>(aq) com 5,22% e NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup> com 1,80%. O grupo II apresenta o 94,22% de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 4,93% de NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 1,19% de MgSO<sub>4</sub>(aq) e 0,88% de CaSO<sub>4</sub>(aq). As águas do grupo III apresentam 85,82% de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 7,19% de CaSO<sub>4</sub>(aq), 4,88% de NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup> e 2,45% de MgSO<sub>4</sub>(aq). No grupo IV as espécies iônicas estão distribuídas com 70,36% de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 20,45% de CaSO<sub>4</sub>(aq), 5,22% de NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup> e 4,97% de MgSO<sub>4</sub>(aq).

#### **9.7.5.8. Flúor**

O flúor é o mais eletronegativo de todos elementos e em solução está sob forma de F<sup>-</sup>. A principal fonte, de acordo com Hem (1985) é a fluorita (CaF<sub>2</sub>), que apresenta baixa solubilidade e ocorre em rochas ígneas e sedimentares. A flúor-apatita, hornblenda e algumas micas também podem contribuir como fonte de flúor. Nas águas do grupo I as espécies iônicas encontradas possuem as seguintes proporções: 99,50 % de F<sup>-</sup> e 1,73% de MgF<sup>+</sup>. As águas do grupo II apresentam somente a forma F<sup>-</sup>. No grupo III a proporção é de 98,98% de F<sup>-</sup> e 1,15 % de CaF<sup>+</sup>. O grupo IV tem 96,03% de F<sup>-</sup>, 2,91% de CaF<sup>+</sup> e 1,05% de MgF<sup>+</sup>.

#### **9.7.5.9. Sílica**

A SiO<sub>2</sub> cristalina como quartzo é o maior constituinte de muitas rochas ígneas e compõem a maioria dos grãos de arenitos. No entanto, o quartzo é muito resistente ao ataque químico feito pela água. A sílica microcristalina (calcedônia) e os tipos amorfos

como chert, e opala são mais solúveis. Segundo Hem (1985), a maioria da sílica dissolvida nas águas naturais é originária do intemperismo químico dos silicatos. Tais processos são irreversíveis e a sílica mantida em solução é provavelmente controlada por fatores cinéticos nos processos de dissolução, adsorção ou por precipitação de um mineral secundário como uma das formas menos organizadas de sílica. A precipitação de direta de quartzo é improvável para controlar a solubilidade da sílica na maioria das águas em que a temperatura é a ambiente na superfície terrestre.

Nas águas do grupo I a especiação da sílica obedece às seguintes proporções: 69,41% de  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ , 30,06% de  $\text{HSiO}_3^-$  e 2,78%  $\text{NaHSiO}_3(\text{aq})$ . No grupo II a sílica está expressa como 82,97% de  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ , 13,23% de  $\text{HSiO}_3^-$  e 3,78% de  $\text{NaHSiO}_3(\text{aq})$ . As águas do grupo IV apresentam 94,94% de  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ , 3,18% de  $\text{HSiO}_3^-$  e 3,03% de  $\text{NaHSiO}_3(\text{aq})$ .

#### 9.7.6. Análise dos Isótopos Estáveis

Os isótopos ambientais estáveis ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  e  $^{13}\text{C}$ ) foram analisados para complementar as informações hidrogeoquímicas, a fim de corroborar a distinção entre as águas dos diversos grupos hidrogeoquímicos, determinar sua origem, processos de recarga e tempo de residência das águas.

Os resultados de  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  são expressos em ‰ em relação ao Padrão Médio da Água do Oceano-Viena (VSMOW) determinado pela equação:

$$\delta = \left\{ \left[ \frac{(1.000 + R_{\text{amostra}})}{(1.000 + R_{\text{padrão}})} \right] - 1 \right\} * 1.000 \quad (7)$$

,onde  $R_{\text{amostra}}$  significa a razão  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ou  $^2\text{H}/^1\text{H}$  da amostra e  $R_{\text{padrão}}$  corresponde à razão no VSMOW.

Os padrões isotópicos podem ser influenciados pela distância do oceano e pela altitude. Como a área de estudo está localizada na região do planalto, com altitudes de até 1.000 m, e distante cerca pelo menos 400 km do limite oceânico, os padrões isotópicos podem ser afetados. Para comparação e traçado das retas meteóricas locais, os dados isotópicos de precipitação obtidos junto a rede GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*) nas estações de Porto Alegre (RS) (Código 8396700) e Corrientes, Argentina (código 8716600) (IAEA, 2004).

Nas águas do Grupo I a razão isotópica ( $\delta$ )  $^2\text{H}$  variou de -41,05 a -29,67 e o  $\delta$   $^{18}\text{O}$  oscilou entre -6,85 e -5,23. O Grupo II tem suas águas com  $\delta$   $^2\text{H}$  entre -44,09 a -23,97 e o  $\delta$   $^{18}\text{O}$  variando de -6,68 a -5,68. As águas do Grupo III, que captam exclusivamente o SASG, tem o  $\delta$   $^2\text{H}$  variando entre -37,58 e -28,63 e o  $\delta$   $^{18}\text{O}$  oscilando entre -6,56 e -5,53. No Grupo IV o  $\delta$   $^2\text{H}$  varia entre -34,35 e -24,16 e o  $\delta$   $^{18}\text{O}$  de -6,39 a -5,98.

A Figura 90 representa o diagrama  $\delta^2\text{H} \times \delta^{18}\text{O}$  para todas as amostras pertencentes aos quatro grupos hidrogeoquímicos e reflete o fracionamento isotópico das águas. Esta figura também contém as retas meteóricas Global e as locais mais próximas da área de estudo (Porto Alegre e Corrientes).

A equação da reta meteórica Global (Rosanski *et al*, 1993) obedece à seguinte equação:

$$\delta^2\text{H} = 8,17 \delta^{18}\text{O} + 11,27 \quad (8)$$

A reta meteórica local de Porto Alegre (RS) (IAEA, 2004) é descrita pela equação abaixo:

$$\delta^2\text{H} = 7,65 \delta^{18}\text{O} + 10,16 \quad (9)$$

A equação da reta meteórica local de Corrientes-AR(IAEA, 2004) é determinada pela seguinte relação:

$$\delta^2\text{H} = 7,79 \delta^{18}\text{O} + 9,86 \quad (10)$$

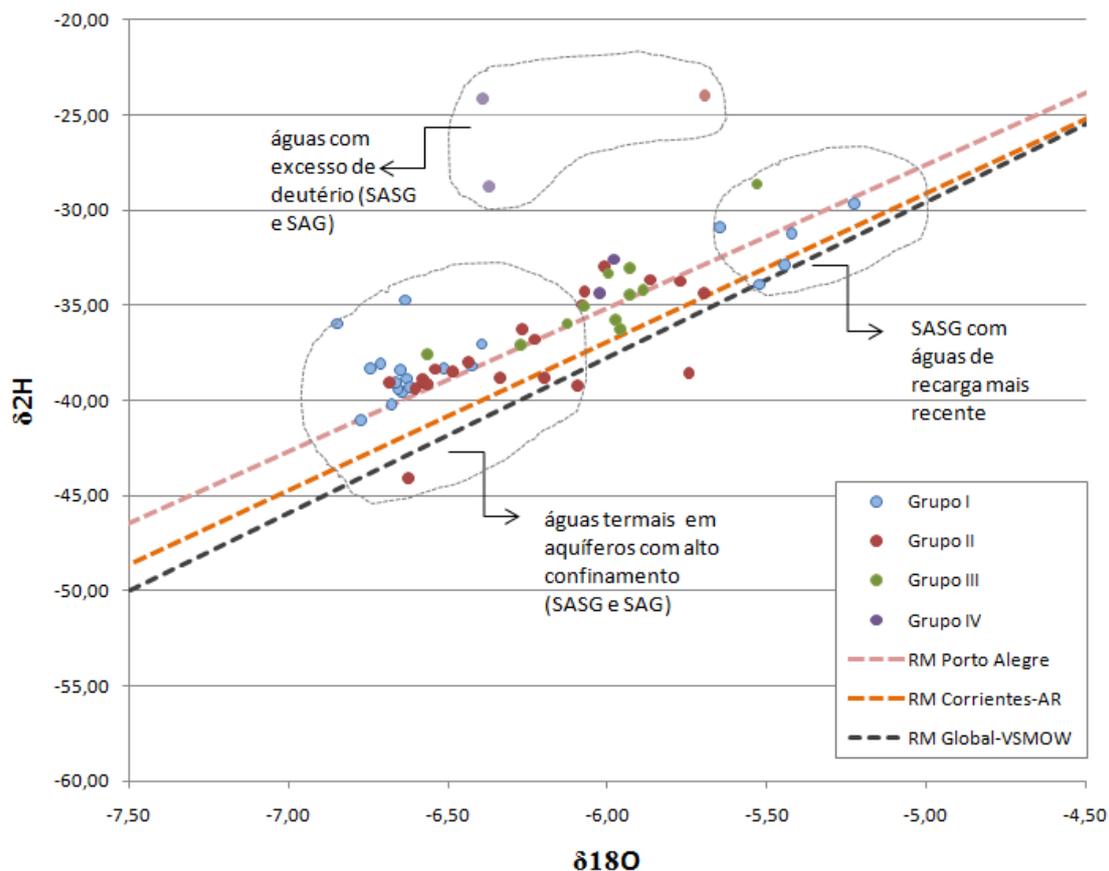


Figura 90. Diagrama  $\delta^2\text{H} \times \delta^{18}\text{O}$  para todas as amostras pertencentes aos quatro grupos hidrogeoquímicos e as retas meteóricas locais mais próximas da área de estudo e da reta Global.

A maioria dos poços está alinhada próxima à reta meteórica de Porto Alegre e se desloca levemente das retas meteóricas Global e de Corrientes. Os poços que se agrupam ao longo das retas meteóricas confirmam que a recarga dos aquíferos envolvidos é de origem meteórica. Os poços agrupados na zona de maior depleção de  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  representam os grupos hidrogeoquímicos I, II e II e captam o SASG em alto confinamento e o SASG termal, tratando-se provavelmente de águas mais antigas. No outro extremo, com os isótopos  $^2\text{H}$  e  $^{18}\text{O}$  menos empobrecidos, ocorrem poços do Grupo I exclusivamente do SASG não termais que, provavelmente, devido às condições potenciométricas, são decorrentes de mistura com águas derivadas de recarga com origem pluviométrica mais recente. Entre os dois extremos ocorrem poços dos grupos II, III e IV em situação intermediária.

Os poços IN-710 e IN-701, que captam o SASG e pertencem ao grupo IV, juntamente com o poço Termas Três Arroios, que capta o SAG e faz parte do grupo II, estão deslocados em relação às retas meteóricas. Estes poços são os que apresentam maior excesso de deutério, o que provavelmente pode ser explicado pelas condições

extremas de evaporação da água na ocasião da recarga dos aquíferos. Em períodos secos, quando as precipitações e o teor de umidade atmosférica são menores e as temperaturas são maiores, ocorre aumento no excesso de deutério nas águas subterrâneas, indicando contribuição da recarga proveniente de chuvas deste período.

O isótopo de  $^{13}\text{C}$  consiste em um importante traçador da origem dos compostos de carbono e do ciclo do carbono. A Figura 91 ilustra os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para os compostos naturais que possuem carbono em sua composição.

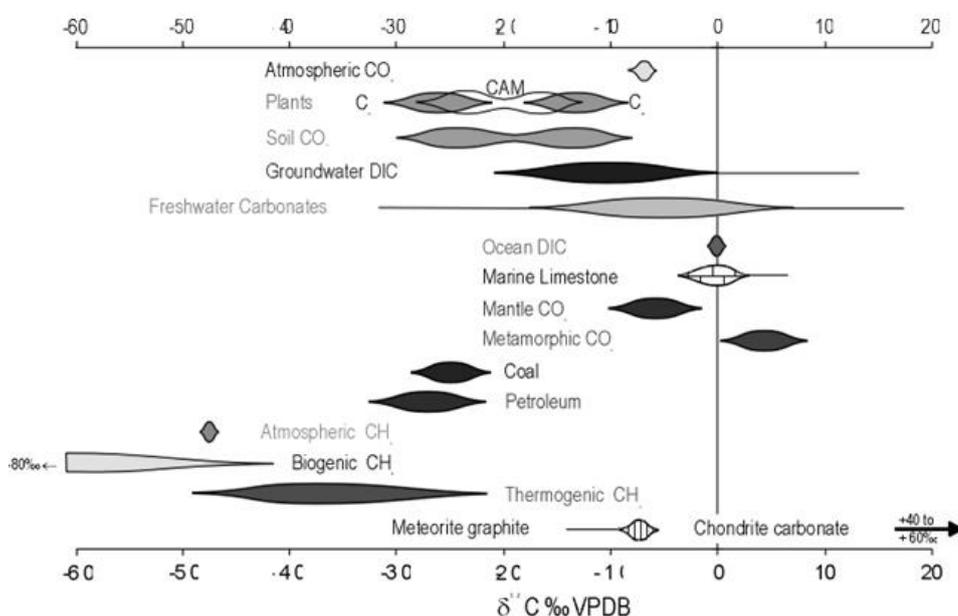


Figura 91. Variação do  $\delta^{13}\text{C}$  nos compostos naturais que possuem carbono em sua composição (modificado de Clark & Fritz, 1999).

O ciclo do carbono nas águas subterrâneas começa nas áreas de recarga, controlado pelo  $\text{CO}_2$  dissolvido no solo (CLARK e FRITZ, 2000). As reações envolvendo os carbonatos dominam a evolução geoquímica neste horizonte e o ânion  $\text{HCO}_3^-$  é geralmente dominante nas águas doces. As águas doces, originadas a partir de águas meteóricas, na maioria dos casos, infiltram nos solos em direção aos aquíferos. Ao longo deste caminho, o carbono inorgânico dissolvido (CID) é incorporado à água subterrânea pela dissolução do  $\text{CO}_2$  e é incrementado pelo intemperismo de silicatos e carbonatos. O pH controla a distribuição das espécies de carbono inorgânico dissolvido em bicarbonato e carbonato. As águas subterrâneas geralmente atingem o equilíbrio

com a calcita, cuja solubilidade vai controlar o pH e o equilíbrio das espécies de carbonato.

A composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido nas águas subterrâneas é controlada pela composição dos isótopos do CO<sub>2</sub> do solo nas zonas de recarga e pelos processos geoquímicos nos quais o CID está envolvido (ARAVENA, 2008). De modo geral os resultados obtidos para o isótopo de <sup>13</sup>C nas águas subterrâneas da área de estudo mostram 3 grupos distintos. Os valores mais negativos, empobrecidos, estão relacionados à contribuição de matéria orgânica e indicam que as águas percolaram por solos e manto de intemperismo no processo de recarga por precipitação pluviométrica. Os Valores de <sup>13</sup>C menos empobrecidos e próximos a 0‰ indicam contribuição de rochas carbonáticas.

As águas do Grupo I apresentaram valores do isótopo <sup>13</sup>C entre -16,76 e -7,94‰, mas com dois comportamentos distintos. As águas mais depletadas e com menor salinidade referem-se a poços do SASG que recebem através das fraturas, águas de origem meteórica mais recente (Figura 92). As demais amostras possuem δ<sup>13</sup>C menos depletados (entre -8,0 e -10,0‰) estão ligadas às águas do SAG e SASG termais com maior alcalinidade total, predominantemente do tipo bicarbonatadas sódicas.

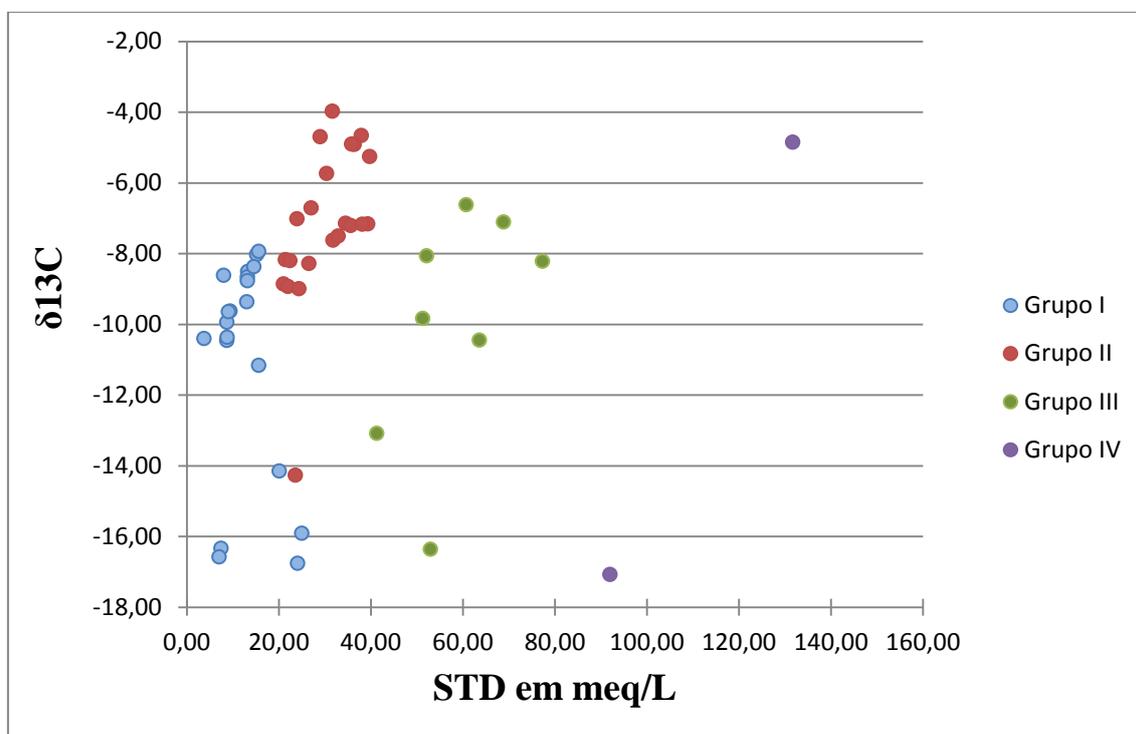


Figura 92. Diagrama binário entre a salinidade das águas, representada pelo STD em meq/L, e o δ<sup>13</sup>C.

No grupo II, o  $\delta^{13}\text{C}$  oscilou entre -14,27 e -3,98 ‰, mas a grande maioria das águas que apresenta o  $\delta^{13}\text{C}$  menos depletado, indicando que há uma quantidade maior de carbono inorgânico dissolvido decorrente da alta alcalinidade e da presença de carbonatos.

As águas do Grupo III também apresentam comportamentos diferentes em relação ao  $\delta^{13}\text{C}$ . Os poços IV-986 e JQ-528 apresentam-se mais empobrecidos em  $\delta^{13}\text{C}$  e com menor salinidade que os demais. Provavelmente há mistura com águas superficiais derivadas de recarga meteórica. Os outros poços deste grupo são mais salinos e mostram  $\delta^{13}\text{C}$  menos depletado. Tal fato aliado ao termalismo presente em muitas delas e à sua tipologia hidroquímica (sulfatada-cloretada-sódica), sugere que estas águas são mais antigas e estão relacionadas à recarga ascendente do Pré-SAG. Neste grupo observa-se uma relação inversamente proporcional entre o  $\delta^{13}\text{C}$  e o IS da calcita (Figura 93), sugerindo que está ocorrendo precipitação de calcita no SASG em fraturas e zonas amigdalóides.

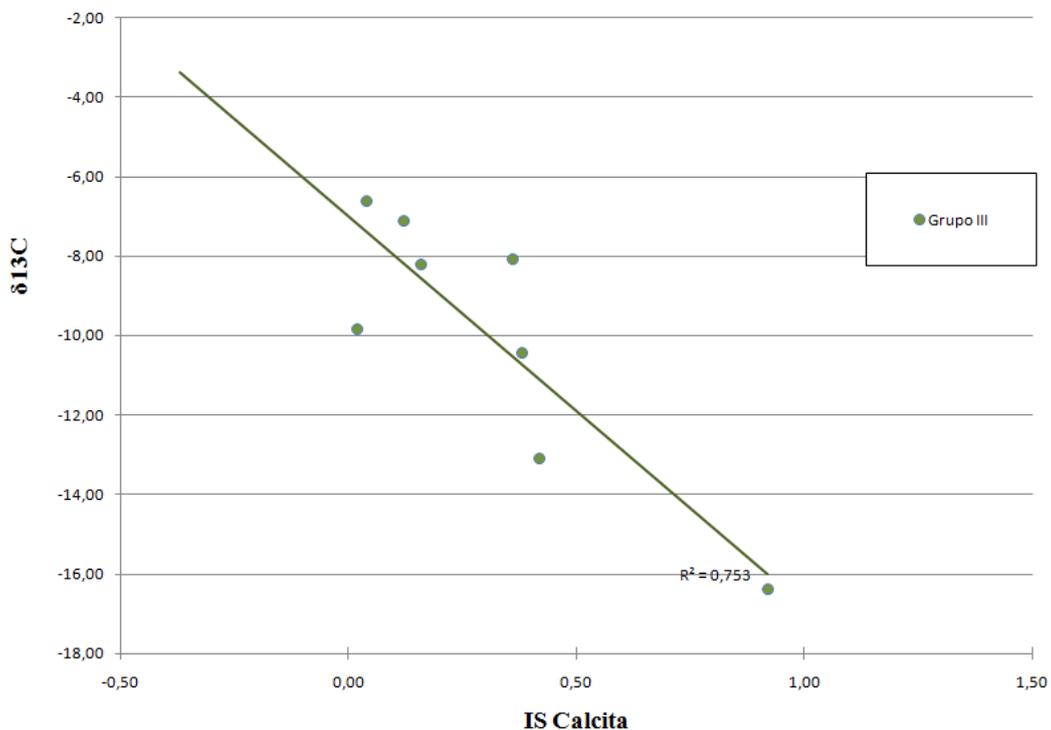


Figura 93. Relação inversa entre o  $\delta^{13}\text{C}$  e o índice de saturação da calcita nas águas do Grupo III do SASG.

Somente em dois poços do Grupo IV foi possível a determinação de  $^{13}\text{C}$ , pois nas amostras dos poços IN-7101 e IN-710 não foi gerado gás para carbono. Os resultados

obtidos nas duas amostras em que foi possível determinar o  $\delta^{13}\text{C}$  indicam que no poço S-236-BR-SJ há contribuição de rochas carbonáticas, enquanto que no poço SGAR, do SASG, há mistura com águas de recarga meteórica.

## 9.8. AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA TERMAL ATRAVÉS DO GEOTERMÔMETRO DE SÍLICA

### 9.8.1. Introdução

Entre as várias aplicações dos geotermômetros destaca-se a estimativa da profundidade de circulação das águas termais. Tal informação possibilita reconhecer indiretamente a unidade hidroestratigráfica pela qual as águas termais vinculadas ao SASG e SAG transitaram. Neste item é feita uma breve descrição dos geotermômetros com destaque para o geotermômetro de sílica. Posteriormente são apresentados o gradiente geotérmico para a área de estudo e a estimativa da profundidade de circulação das águas termais, bem como em quais unidades hidroestratigráficas elas circularam.

### 9.8.2. Geotermômetros

O geotermômetro é definido como o constituinte químico dissolvido em fluidos intersticiais, cuja concentração é controlada por reações, dependentes da temperatura entre estes fluídos e a assembleia mineralógica da rocha hospedeira (NOLLA, 1995). Considerando que a amostra de água coletada na boca do poço é representativa da composição química da água no interior do aquífero, é possível estimar a temperatura do reservatório com a aplicação de geotermômetros baseados nas condições de equilíbrio químico das espécies minerais nas diversas temperaturas. Para que um determinado composto químico possa ser usado como geotermômetro, algumas condições devem ser obedecidas, como:

- a) adequado suprimento de reagentes;
- b) estabelecimento do equilíbrio entre a água e os minerais, na temperatura do aquífero;
- c) ausência de reações adicionais no percurso da água até o ponto de amostragem (FOURNIER *et al.*, 1974 *apud* NOLLA, 1995);
- d) ausência de processos de mistura de água com outras águas subterrâneas ou superficiais (HURTER *et al.*, 1983).

Os geotermômetros são classificados como gasosos ou líquidos, de acordo com a fase em que se encontra o componente químico escolhido para estimar a temperatura. Hindi (2007) relaciona os seguintes geotermômetros mais utilizados para estimativas de temperaturas em subsuperfície:

- Geotermômetros de sílica, como o quartzo, calcedônia,  $\alpha$ -cristobalita,  $\beta$ -cristobalita, opala e sílica amorfa;
- Geotermômetros de solutos iônicos como o de Na-K, K-Mg, Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg, Na-Li e Mg-Li;
- Geotermômetros gasosos como  $\text{CO}_2\text{-H}_2$ ,  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ .

Nesta pesquisa abordou-se somente o geotermômetro de sílica, pois dados sobre a solubilidade da sílica são abundantes na literatura e permitem estabelecer relações confiáveis entre a temperatura e as constantes de equilíbrio da reação de dissolução da sílica. Por estas características, os geotermômetros de sílica são largamente utilizados no estudo de águas termais. Os geotermômetros de solutos iônicos podem ser influenciados por processo de troca iônica e não somente representarem a dissolução de feldspatos presentes no aquífero e, portanto, não foram aqui utilizados.

A sílica é encontrada nas seguintes formas estáveis: quartzo, calcedônia, tridimita, cristobalita, coesita, stishovita e sílica amorfa. O quartzo é a fase mais estável e menos solúvel, enquanto que a sílica amorfa é a fase menos estável e mais solúvel, representando os casos extremos nos processos de dissolução e precipitação da sílica nos sistemas hidrotermais. Consequentemente, a solubilidade das demais formas de sílica, situam-se entre esses dois extremos.

O trabalho experimental de Morey *et al.* (1962 *apud* Nolla, 1995) sobre a solubilidade do quartzo na pressão de vapor, e os experimentos de Kennedy (1950 *apud* Nolla, 1995), com altas temperaturas, forneceram as bases teóricas para o geotermômetro de sílica. Fournier e Rowe (1966) descreveram pela primeira vez um método utilizando a concentração de sílica em águas de poços e fontes termais para estimar a temperatura do aquífero, assumindo que estas águas estavam em equilíbrio com os minerais de sílica. Estes autores acrescentaram à curva de Morey *et al.* (1962 *apud* Nolla, 1995) uma curva de solubilidade do quartzo levando em consideração um resfriamento adiabático do fluido produzido durante seu percurso até a superfície (Figura 94).

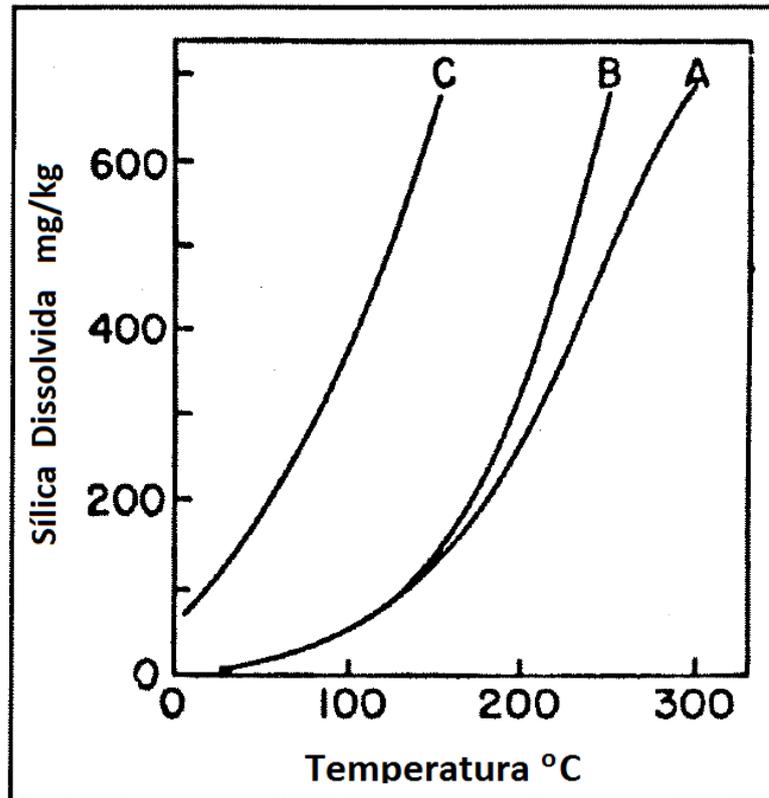


Figura 94. Curvas de solubilidade do quartzo (A) e da sílica amorfa (C) em função da temperatura na pressão de vapor da solução. A curva B mostra a concentração de sílica em solução após um resfriamento adiabático até a temperatura de 100 °C, a partir de uma solução inicialmente em equilíbrio como quartzo (modificado de Fournier & Rowe, 1966).

A concentração da sílica aquosa é fortemente controlada pelo pH da solução e depende de dois processos opostos: a dissolução de minerais, contendo sílica na rocha matriz, e a precipitação de sílica durante o transporte em meio aquoso (D'Amore & Arnórsson, 2000, *apud* Hindi, 2007). A sílica, por não apresentar soluções sólidas, dissolve-se de forma congruente, de acordo com as seguintes reações (Faure, 1998 *apud* Hindi, 2007):



A concentração total de sílica em solução é equivalente à soma das parcelas de cada uma das espécies resultantes das sucessivas dissociações mostradas nas reações (11) a (15). Calculando-se as concentrações de equilíbrio entre sílica amorfa e quartzo em água pura a 25 °C, verifica-se que para pH menor que 10, o teor de sílica dissolvida é controlado pelo ácido silícico sendo dependente apenas da temperatura da solução.

Em soluções alcalinas (pH  $\approx$  9), a dissociação do ácido silícico, formando  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  aumenta consideravelmente e, conseqüentemente, majora a concentração de espécies iônicas contendo Si na solução. As demais espécies têm participação irrelevante no total de sílica em solução. O gráfico da Figura 95. Variação da solubilidade da sílica amorfa e do quartzo, em água pura a 25 °C, em função do pH (Hindi, 2007). ilustra o comportamento da variação da solubilidade da sílica amorfa e do quartzo em função do pH (HINDI, 2007). Observa-se que para pH inferior a 8, a dissolução do quartzo corresponde a menos de 7% da contribuição para a concentração total de sílica dissolvida. A partir deste valor de pH, tanto a dissolução do quartzo quanto de sílica amorfa crescem indefinidamente.

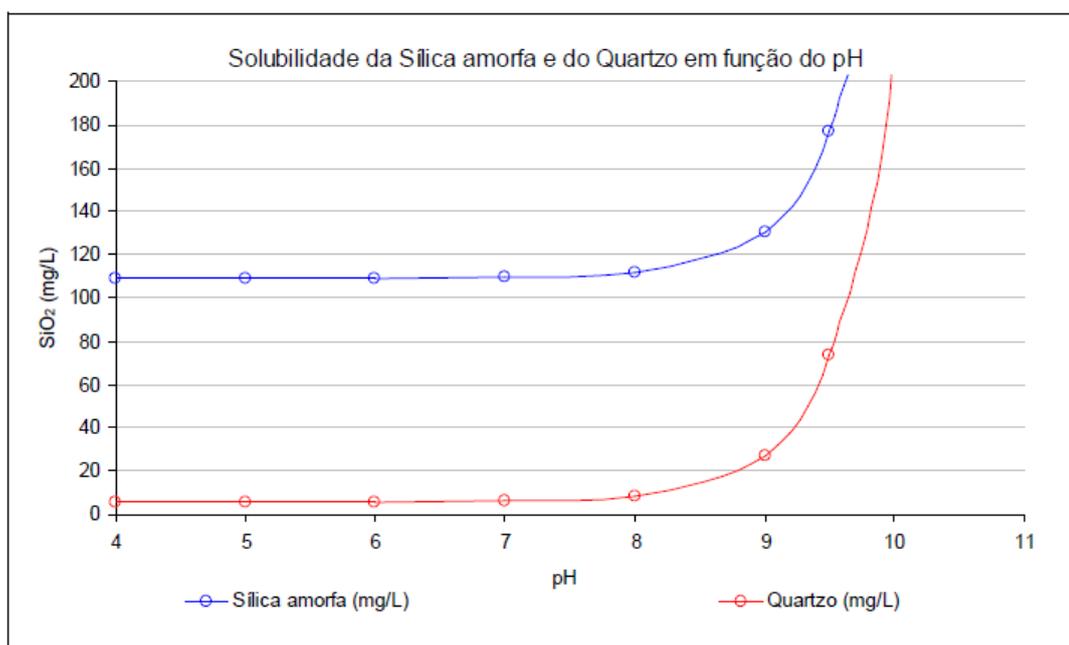


Figura 95. Variação da solubilidade da sílica amorfa e do quartzo, em água pura a 25 °C, em função do pH (Hindi, 2007).

Verma (2000, *apud* Hindi, 2007) realizou experimentos de solubilidade de sílica, levando em consideração presença de vapor, e afirma que uma limitação à aplicação de geotermômetros é a dificuldade de se determinar as quantidades de fases vapor e líquidas da água no reservatório, já que a sílica se solubiliza apenas na fase líquida. Isso

implica na diminuição da solubilidade da sílica, com o aumento da temperatura, quando esta ultrapassa valores da ordem de 150°C, exigindo uma correção da solubilidade, devido à fase vapor. No entanto, quando as temperaturas forem inferiores a 150 °C , essa limitação não deve afetar, de forma expressiva, a estimativa de temperatura do reservatório, usando equações de solubilidade do quartzo.

Para Fournier (1989,*apud* Hindi2007), em temperaturas abaixo de 300 °C, a variação da pressão e do conteúdo de substâncias dissolvidas pouco influi na solubilidade do quartzo e da sílica amorfa, permitindo o uso da concentração de sílica dissolvida como geotermômetro.

Para as várias aplicações deste geotermômetro Hurter *et al.* (1983) cita que devem ser assumidas algumas premissas básicas quanto à sua validade em casos reais:

- a água e o material rochoso no sistema geotermal devem estar em equilíbrio químico;
- não deve ocorrer precipitação de sílica no trajeto das águas termais;
- não há mistura com outras águas subterrâneas ou superficiais durante a migração da água termal do reservatório ao ponto de amostragem;
- não ocorrem reações entre rocha e a água termal durante sua ascensão.

As equações dos geotermômetros de sílica são deduzidas, assumindo-se o estado de equilíbrio entre as fases sólidas e líquidas em função da temperatura, derivando, geralmente, da equação de Van't Hoff, que expressa a dependência da constante de equilíbrio de uma relação com a temperatura, ou da regressão de dados experimentais de solubilidade de sílica e temperatura.

Nesta pesquisa o cálculo do geotermômetro de quartzo sem perda de vapor foi realizado somente para as amostras de água com temperaturas acima de 25 °C, descartando-se as águas consideradas frias segundo o Código de Águas Minerais (BRASIL, 1945). Os cálculos foram feitos no pacote computacional *AquaChem*, que utiliza a equação de Fournier (1977). Os resultados estão listados na Tabela 27, juntamente com as temperaturas da água na boca do poço e concentrações de SiO<sub>2</sub> medidas em laboratório.

As maiores temperaturas obtidas para o geotermômetro de sílica correspondem aos poços mais profundos da área de estudo que captam o SAG em São Lourenço do Oeste (JP-712), em Maravilha (JP-714) e o Pré-SAG em São João do Oeste (S-236-BR-

SJ). As geotemperaturas de sílica mais elevadas do SASG ocorrem na fonte termal (VDF) e no poço termal (JQ-504) em Vicente Dutra, no Balneário Municipal do Prado, e na Fonte Taquaruçu (IR-862) localizada em Palmitos, SC. Tais características sugerem que estas águas circularam em grandes profundidades.

Tabela 27. Geotermômetro de sílica para as águas termais da área de estudo.

Poço	Grupo	Temperatura da água na boca do poço (°C)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	Geotermômetro de SiO <sub>2</sub> Qz (°C) (Fournier, 1977)
IN-502	I	37	20,4	54
IN-503	I	33	19,5	52
IN-504	I	32	19	52
IR-848	I	26	15,5	44
TP2-SC	I	29	14,6	42
JP-354	I	27,2	24,3	60
JP-709	I	30	23,9	59
JP-712	I	50	40,27	91
JP-714	I	57	35,4	75
JQ-183	I	30	24,8	60
JQ-184	I	32,9	23	59
2-MR-1-RS	II	36,7	16,1	46
Cascata Nazzari	II	35,4	16,6	46
IH-941	II	42	21	56
IV-882	II	38	20,1	54
Termas 3 Arroios	II	32	21,9	56
Agrodanieli	II	41,2	23	59
Bom Gosto	II	42,3	25,9	62
CPRM 901	II	36	15,1	44
IR-900	II	37	14	42
IR-902	II	36	15,1	44
OCF	II	33	17,5	48
ERE-19-COR	II	32,4	23	59
ACHDO-1	II	31	14,2	42
ACHDO-2	II	33	14,8	42
IV-163	II	30	17,3	48
IV-201	II	29,8	13,7	39
JP-711	II	34	20,4	54
TP1-SC	II	36	14,8	42
TPG	II	38	15,3	44
IR-862	III	31	18,2	50
JQ-504	III	34	23,7	59
VDF	III	32	24,6	60
S-236-BR-SJ	IV	53	39,4	79

### 9.8.3. Gradiente geotérmico

Gradiente geotérmico é definido como o incremento da temperatura com a profundidade na crosta terrestre. Com as profundidades atingidas por modernas técnicas de perfuração, muitas vezes superando os 10.000 metros, o gradiente geotérmico médio medido é de cerca de 2,5 a 3,0°C / 100 m (DICKSON e FANELLI, 2004). Há, no entanto, grandes áreas em que o gradiente geotérmico é muito diferente do valor médio. Nas áreas onde as rochas do embasamento sofreram um afundamento rápido e a bacia foi preenchida com sedimentos mais jovens o gradiente geotérmico pode ser inferior a 1°C / 100 m. Por outro lado em algumas “*áreas geotermiais*” o gradiente geotérmico supera em mais de uma dezena de vezes o valor médio.

O gradiente geotérmico médio na área de estudo foi estimado utilizando-se o coeficiente angular da reta ajustada aos pontos correspondentes aos pares temperatura da água medida em superfície e profundidade do topo do SAG (Figura 96), determinada pela espessura de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral nos 19 poços relacionados na Tabela 28.

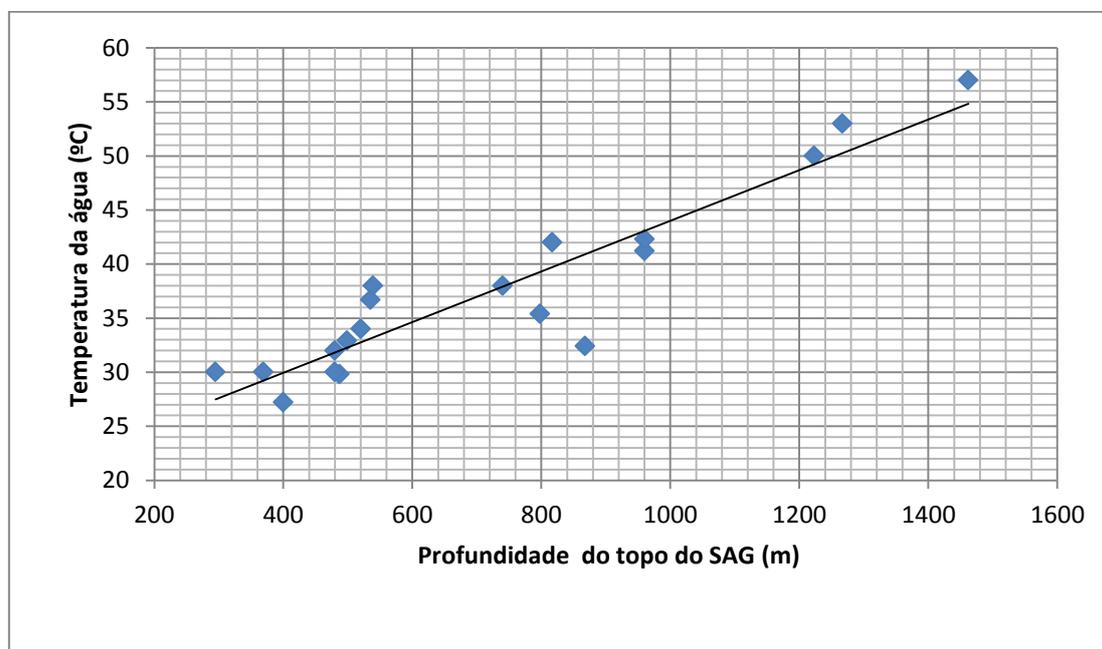


Figura 96. Relação entre a profundidade do topo do SAG e a temperatura da água medida na boca dos poços.

A regressão linear resultou na seguinte relação:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0,0235 P(\text{m}) + 20,55 \quad (16)$$

, onde T é a temperatura da água em graus Celsius e P consiste na profundidade do topo do SAG, medida em metros. A regressão linear, que possui um  $R^2$  de 0,86, resultou em um coeficiente angular de 0,0235. Deste modo, o gradiente geotérmico médio para a área de estudo é de 23,5  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ou  $1^{\circ}\text{C}$  para cada 42,5 metros. Este valor é muito próximo com o valor médio para a Bacia do Paraná de 24,0  $^{\circ}\text{C}$ , obtido por Gomes (2010). Por outro lado o gradiente geotérmico calculado é inferior ao registrado por Araújo *et al.* (1995), de 29 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ; Teissedre e Barner (1982), 28,6 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$  e por Hindi (2007) no Estado do Paraná, 26,6  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

Tabela 28. Dados da espessura de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e temperatura da água em poços que captam o SAG.

Poço	Município	UF	Profundi- dade do poço (m)	Espessura do confinamento(m)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
2-MR-1-RS	Marcelino Ramos	RS	800,00	535,00	36,70
Agrodanielli	Tapejara	RS	968,00	960,00	41,20
Bom Gosto	Tapejara	RS	962,00	960,00	42,30
Cascata Nazzari	Erechim	RS	870,00	798,00	35,40
ERE-19-CORSAN	Erechim	RS	929,00	868,00	32,40
IH-941	Machadinho	RS	983,00	817,00	42,00
IV-163	Itá	SC	511,40	369,00	30,00
IV-201	Itá	SC	924,00	487,50	29,80
IV-882	Piratuba	SC	700,00	539,00	38,00
JP-354	Treze Tílias	SC	597,00	400,00	27,20
JP-709	Seara	SC	588,00	480,00	30,00
JP-711	Pres.Castelo Branco	SC	702,00	520,00	34,00
JP-712	Maravilha	SC	1305,00	1223,00	50,00
JP-714	S. Lourenço do Oeste	SC	1560,00	1462,00	57,00
JQ-183	Campos Novos	SC	296,00	295,00	30,00
JQ-184	Ouro	SC	516,00	499,00	32,90
S-236-BR-SJ	São João do Oeste	SC	1376,00	1267,00	53,00
Termas 3 Arroios	Três Arroios	RS	1000,00	480,00	32,00
TPG	São Carlos	SC	852,00	740,00	38,00

De acordo com Pirlo (2004), se a temperatura da água subterrânea, medida na boca do poço for um indicador confiável da temperatura do aquífero, um gráfico bidimensional, com eixos correspondentes às temperaturas medidas e calculadas, resultará em uma reta com coeficiente de correlação próximo da unidade e coeficiente linear em torno de zero. O gráfico bidimensional da Figura 97 demonstra uma reta com considerável dispersão de pontos e baixa correlação linear.

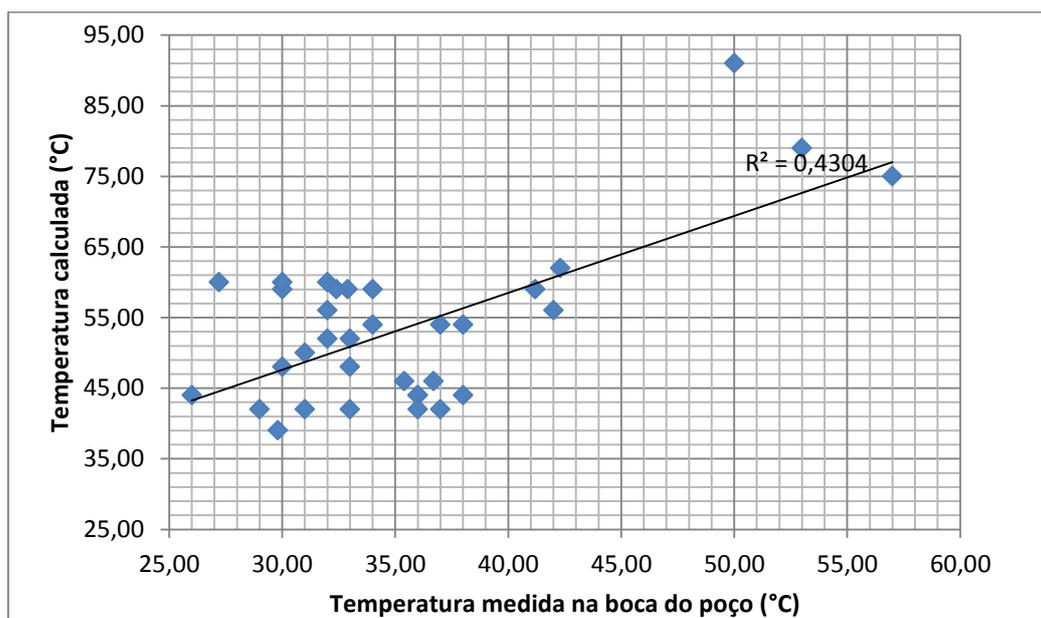


Figura 97. Gráfico de dispersão entre as temperaturas calculadas pelo geotermômetro de sílica e as temperaturas da água medidas na boca dos poços.

#### 9.8.4. Profundidade máxima de circulação das águas

O geotermômetro de sílica e o gradiente geotérmico possibilitaram estimar a profundidade de circulação das águas termais. Deve ser assinalado que pode haver imprecisão na estimativa das temperaturas calculadas e, conseqüentemente, da profundidade de circulação, devido à mistura de águas ou, ainda, problemas na determinação das concentrações de sílica.

Considerando o valor do gradiente geotérmico médio para região de emergência de uma determinada água termal, é possível estimar a profundidade máxima alcançada pelo sistema hidromineral (MARQUES *et al.*, 2012). Segundo esses autores, tal valor é obtido através da equação:

$$P = (Tr - Ta) / gg \quad (17)$$

,onde P é a profundidade máxima de circulação em km, Tr é a temperatura da água no aquífero (°C) determinada pelo geotermômetro de SiO<sub>2</sub>, Ta é a temperatura média anual na região em estudo (°C) e gg é o gradiente geotérmico médio da área (°C/km).

Com o gradiente geotérmico definido para a área de estudo e a temperatura da água no aquífero determinada pelo geotermômetro de sílica, foi calculada, através da equação (17), a profundidade máxima de circulação das águas termais para cada ponto amostrado (Tabela 29). A temperatura média anual foi obtida no portal *Climate-data.org* disponível em <http://pt.climate-data.org>, que disponibiliza os dados climáticos para cada município.

Os poços JP-712 e JP-714, que atingiram as maiores profundidades de circulação das águas, estão localizados nas áreas mais elevadas e com maior espessura de rochas vulcânicas. Tanto os poços que captam o SASG e o SAG apresentaram profundidades de circulação superiores às profundidades dos poços, o que pode ser explicado pela circulação das águas subterrâneas através de grandes zonas de fratura ou de falhas, que interceptam as litologias da Bacia do Paraná. Essas águas ascenderam através de fluxos verticais e podem ter sofrido mistura com águas mais próximas à superfície e conseqüentemente mais frias.

Tabela 29. Temperatura da água no aquífero calculada pelo geotermômetro de sílica e profundidade máxima de circulação nos poços termais.

Poço	Sistema Aquífero	Grupo	Cota da boca do poço(m)	Temperatura média anual (°C)	Temperatura de SiO <sub>2</sub> (°C)	Profundidade Máxima de circulação (km)
IN-502	SASG	I	382	19,4	54,00	1,47
IN-503	SASG	I	388	19,4	52,00	1,39
IN-504	SASG	I	388	19,4	52,00	1,39
IR-848	SASG	I	240	20,4	44,00	1,00
TP2-SC	SASG	I	229	20,4	42,00	0,92
JP-354	SAG	I	850	16,7	60,00	1,84
JP-709	SAG	I	479	18,8	59,00	1,71
JP-712	SAG	I	571	18,7	91,00	3,08
JP-714	SAG	I	702	16,5	75,00	2,49
JQ-183	SAG	I	496	17,8	60,00	1,80
JQ-184	SAG	I	503	17,8	59,00	1,75
2-MR-1-RS	SAG	II	367	19,2	46,00	1,14
Cascata Nazzari	SAG	II	624	17,7	46,00	1,20
IH-941	SAG	II	720	17,2	56,00	1,65
IV-882	SAG	II	441	19	54,00	1,49
Termas 3 ARR	SAG	II	536	18,6	56,00	1,59
AGRODANIELI	SAG	II	617	17,9	59,00	1,75
Bom Gosto	SAG	II	654	17,9	62,00	1,88
F02-CPRM 901	SASG	II	221	19,8	44,00	1,03
IR-900	SASG	II	251	20,4	42,00	0,92
IR-902	SASG	II	230	19,8	44,00	1,03
OCF	SASG	II	218	20,4	48,00	1,17
ERE-019-COR	SAG	II	668	17,7	59,00	1,76
ACHDO-1	SASG	II	230	20,5	42,00	0,91
ACHDO-2	SASG	II	230	20,5	42,00	0,91
IV-163	SAG	II	463	19,4	48,00	1,22
IV-201	SAG	II	469	19,4	39,00	0,83
JP-711	SAG	II	575	19	54,00	1,49
TP1-SC	SASG	II	239	20,4	42,00	0,92
TPG	SAG	II	235	20,4	44,00	1,00
IR-862	SASG	III	202	19,8	50,00	1,29
JQ-504	SASG	III	200	20,3	59,00	1,65
VDF	SASG	III	200	20,3	60,00	1,69
S-236-BR-SJ	Pré-SAG	IV	305	20,5	79,00	2,49

A análise dos relatórios de poços da Petrobras e Paulipetro (BDEP-ANP) permitiu comparar os perfis estratigráficos com as cotas atingidas pela circulação de água. Os poços utilizados para este estudo comparativo foram 2RD-1-RS (Ronda Alta); 1-GO-1-

SC (Galvão); 2-AL-1-SC (Abelardo Luz); 1-SE-1-SC (Seara); 1-HV-1-SC (Herval Velho); 1-MA-1-RS (Machadinho); 2-MR-1-RS (Marcelino Ramos); 2-PI-1-SC (Piratuba) e 2-LV-1-RS (Lagoa Vermelha). No extremo oeste da área, próximo com a fronteira com a Argentina, estas informações estratigráficas não são disponíveis e a análise foi baseada na extrapolação dos poços de Ronda Alta e Galvão com a devida correção do mergulho da bacia.

A partir da análise dos dados obtidos do geotermômetro de sílica pode ser extrapolado que os poços do grupo I que captam águas do SAG têm circulação a partir das unidades hidroestratigráficas bem mais profundas, como Itararé (JP-712); Rio Bonito (JP-354, JQ-183, JQ-184); Irati (JP-714) e Teresina (JP-709). Nos poços que captam águas termais do SASG a circulação igualmente se dá a partir de unidades hidroestratigráficas do Pré-SAG como a unidade Rio do Rasto (IN-502, IN-503, IN-504). Já nos poços TP-2-SC e IR-848, localizados nas Termas do Prata, em São Carlos (SC), as águas circulam desde a Unidade Hidroestratigráfica Piramboia.

No grupo II as águas do SAG circulam a partir das unidades hidroestratigráficas Teresina (IH-941, IV-882, Termas Três Arroios, Agrodanielle, Bom Gosto, ERE-19-CORSAN, IV-163 e JP-711); Rio do Rasto (Cascatta Nazzari, 2-MR-1-RS, IV-201) e Piramboia (TPG). Já os poços do SASG neste grupo apresentam águas que percolaram a partir das unidades hidroestratigráficas Piramboia (F02-CPRM-901, IR-902, OCF, ACHDO-1, ACHDO-2 e TP-1-SC) e Botucatu (IR-900).

O grupo III tem suas águas termais circulando a partir das unidades hidroestratigráficas Teresina (VDF); Rio do Rasto (JQ-504) e Piramboia (IR-862).

As águas do poço S-236-BR-SJ, único representante do grupo IV, circulam a partir da unidade hidroestratigráfica Teresina.

A Figura 98, elaborada a partir dos estudos de geotermômetro de sílica e do gradiente geotérmico, apresenta as unidades hidroestratigráficas pelas quais circularam as águas termais nos poços da área em estudo, mostrando que existe uma coerência dos resultados para esta condição.

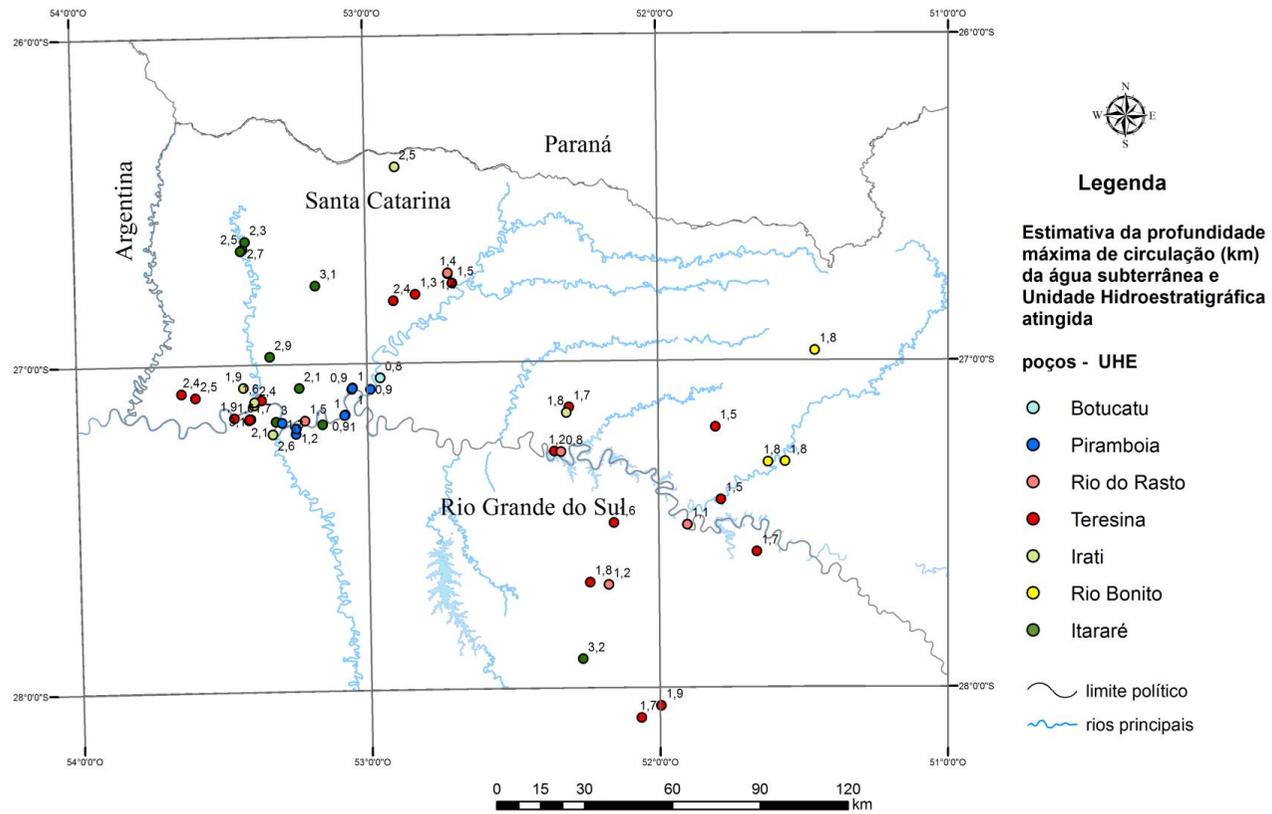


Figura 98. Estimativa da profundidade de circulação das águas subterrâneas e respectivas unidades hidroestratigráficas atingidas.

## 10. CONCLUSÕES

A integração de dados químicos e isotópicos avaliados com a visão da análise exploratória de dados e com a estatística multivariada, combinados com a interpretação estrutural regional mostrou ser eficiente para o entendimento dos processos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos da área em estudo.

A análise exploratória de dados nas águas do SASG nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina revelou que o *background* de condutividade elétrica situa-se entre 117,35 e 378,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . As águas com condutividade elétrica menor que 117,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondem às zonas onde ocorre recarga exclusivamente por precipitação pluviométrica.

As águas com condutividade elétrica superior a 378,35  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspondem aos tipos mais salinos que representam, em parte, o termalismo no Sistema Aquífero Serra Geral, termalismo este proveniente da ascensão de águas derivadas de pacotes sedimentares confinados do Sistema Aquífero Guarani e do Pré-SAG. Estas águas estão intimamente associadas com áreas muito dissecadas localizadas em fundos de vale e com cotas inferiores a 400 m, correspondendo às zonas de descarga dos sistemas aquíferos sotopostos ao SASG.

A condição de termalismo possui forte controle da tectônica rígida, com lineamentos dominantes segundo as direções N-60 a 80-W; N-70 a 80-E e EW. A zona de falha Lancinha-Cubatão, neste caso, delimita a ocorrência de águas termais, ou seja, só ocorre termalismo no SASG no bloco situado a oeste da grande estrutura, que corta o chamado lineamento do Rio Uruguai, de direção aproximada EW.

A Análise de Componentes Principais realizada de forma integrada para as águas do SAG e SASG, apontou que os primeiros componentes explicam 79,91 % da variância e apontam para assinaturas hidrogeoquímicas distintas. A partir destes resultados, o estudo estatístico de agrupamento discriminou quatro grupos que possui clara evolução hidrogeoquímica do grupo I para o IV. Nesta evolução, a condutividade elétrica, as concentrações de cloreto, potássio, sódio, sais dissolvidos, sulfato e estrôncio sofrem incremento, enquanto o pH e o carbonato diminuem.

A tipologia química das águas aponta para tipos bicarbonatados e sulfatados sódicos nos grupos I e II, enquanto o grupo III capta exclusivamente águas do SASG,

possuindo caráter sulfatada sódica a cálcica. O grupo IV exhibe águas cloretadas sódicas e cálcicas.

A maioria dos poços do grupo I está afastada do lineamento do Rio Uruguai e as assinaturas hidrogeoquímicas demonstram que as águas estão intimamente relacionadas com a recarga ascendente do SAG. No grupo II os poços localizam-se na área de influência deste grande lineamento com processos de mistura de águas do SASG com as águas do Pré-SAG, o que se comprova pela maior quantidade de carbono inorgânico dissolvido e pelo registro de expressivo de carbonatos.

Os poços do grupo III estão distribuídos ao longo do Rio Uruguai, no extremo oeste da área, enquanto no grupo IV apresentam-se distribuídos em área bem mais extensa. Em ambos os grupos, torna-se evidente o registro de recarga ascendente a partir das Unidades Hidroestratigráficas Rio do Rasto e Teresina (Pré-SAG) e os resultados isotópicos apontam para processos de mistura com águas recentes de origem pluviométrica no caso do grupo III. No grupo IV o controle estrutural é bem definido e as águas são mais evoluídas e enriquecidas em sais dissolvidos, registrando-se maior excesso de deutério.

O gradiente geotérmico médio calculado para a área de estudo é de 23,5 °C/km, ou 1°C para cada 42,5 metros, considerado próximo ao valor médio para a Bacia do Paraná. Os resultados registrados a partir da aplicação do geotermômetro de sílica para as águas termais demonstraram que as temperaturas calculadas são superiores às medidas na boca do poço, o que pode ser explicado pela dissipação de calor ao longo do percurso da água. Os resultados identificam que a circulação da água nos poços estudados atinge profundidades máximas da ordem de 3,0 km e, em sua maioria, situa-se entre 1,1 e 1,5km.

Os mecanismos e elementos apresentados auxiliam como guias para decisões de gerenciamento do SASG na região.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P. K *et al.* Using  $^{81}\text{Kr}$ -age of groundwater in the Guarani Aquifer, Brazil, to constrain estimates of continental degassing flux of  $^4\text{He}$ . *American Geophysical Union*, Fall Meeting 2013, Washington, DC, abstract #H13I-1489, 2013. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.H13I1489A>>. Acesso em: 17 set. 2015.

ALCALÁ, F. J.; CUSTÓDIO, E. Use of the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in some coastal aquifers of Spain. In: ARAGUÁS, L.; CUSTODIO, E. ;, M. (Ed.) *Groundwater and Saltwater Intrusion: selected papers from the 18th saltwater intrusion meeting*. by), Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2004. p.481–498. (Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España).

ANDRIOTTI, J. L. S. Aplicação da EDA - Exploratory Data Analysis - na determinação de parâmetros em prospecção geoquímica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUIMICA, 14.; SIMPOSIO LATINO-AMERICANO DE MAPEAMENTO GEOQUIMICO, 2013, Diamantina, MG. *Anais....* Diamantina, MG: SBGq, 2013. 1 CD-ROM.

ARAÚJO L. M., FRANÇA A. B., POTTER P. E. *Aqüífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: Mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó*. Curitiba: UFPR/PETROBRÁS, 1995. 16 p.

ARAVENA, R. Estudio de la Dinámica del Agua Subterránea en el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) Mediante Técnicas Isotópicas. Proyecto para La Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Del Sistema Acuífero Guaraní: relatório. Montevideo, 2008. 54 p.

ASMUS, H. E. Controle estrutural da deposição mesozóica nas bacias da margem continental brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.5, n.3, p.160-175, 1975.

BETIOLLO, L. M. *Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guaraní e Serra geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil*. 2006, 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BITTENCOURT, A. V. L.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; FILHO, A. C. B. 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* n. 17, p. 67–75, 2003.

BOFF, F. E.; MEDEIROS, M. A. de; MULLER, A. L.; KOPPE, C. J. Caracterização Hidroquímica das Águas Minerais da Serra do Nordeste Gaúcho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2006, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABAS, 2006.

BONOTTO, D. M. Review of hydrogeochemical and isotopic data in deep groundwaters from Parana basin, Brazil, with some considerations relative to uranium isotopes and ages. *IAEA*, Viena, 1997.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral, Decreto-Lei nº 7.841 de 08/08/1945 Código de Águas Minerais, Estabelece os princípios de pesquisa, classificação e aproveitamento de águas minerais naturais. *Diário Oficial da União*, 20 ago. 1945.

CLARK, I.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton. Florida, 2000. 330p.

CORRÊA, U. M. P. Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo. In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1., 2000, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABAS. 2000. 1 CD ROM.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Atlas pluviométrico do Brasil:** versão 2.0 atualizada. [S.l.]: CPRM, 2011. 1 DVD. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.S. *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega, 1996. 2 v.

DAVIS, S. N.; WHITTEMORE, D. O.; MARTIN, J. F. Uses of Chloride/Bromide Ratio in Studies of Potable Water. *Ground Water*. v.36, n. 2. p.338-350.1998.

DECOUD, P; ROCHA, L. Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1., 2000, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABAS. 2000. 1 CD ROM.

DEUTSCHW. J., *Groundwater Geochemistry: fundamentals and application to contamination*. Boca Raton, Fla, USA,: CRC, 1997.

DIAS, C. L.; SILVA, M. F. B.; CASARINI, D. C. P.; LEMOS, M. M. G. Caracterização hidrogeoquímica e qualidade do Sistema Aquífero Guarani em poços tubulares para abastecimento público no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ABAS, 2000. 1 CD ROM.

DICKSON, M. H.; FANELLI, M. What is a geothermal energy? Disponível em: <[http://www.geothermal-energy.org/314,what\\_is\\_geothermal\\_energy.html](http://www.geothermal-energy.org/314,what_is_geothermal_energy.html)>. Acesso em: 28 mar 2011.

DINIZ, João Alberto Oliveira *et al.* (Coord.) *Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo*: nota técnica. Sistema de Informações Geográficas-SIG. Recife: CPRM, 2014. Programa de Cartografia Hidrogeológica.

FARR T.G., R P.A., CARO E., CRIPPEN R., DUREN R., HENSLEY S., KOBRICK M., PALLER M., RODRIGUEZ E., ROTH L, SEAL D., SHAFFER S., SHIMADA J., UMLAD J., WERNER M., OSKIN M., BURBANK D., ALSDORF D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review of Geophysics*, v.45, n. RG2004, 2007.

FEITOSA, Fernando A. C. (Coord.) *et al.* *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*; 3. ed. rev. e ampl. Fortaleza: CPRM/LABHID, 2008.

FERREIRA, F. J. F.; PORTELA FILHO, C. V.; ROSA FILHO, E. F. da ; ROSTIROLLA, S. P. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani através do Arco de Ponta Grossa (BACIA DO PARANÁ, BRASIL). *Revista Latinoamericana de Hidrogeologia*, Curitiba, v. 5, p. 61-74, 2005.

FOURNIER, R. O.; ROWE, J. J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *American Journal of Scienc.* n. 264, p.685-697, 1966.

FOURNIER, R.O. Chemical geothermometers and mixing model for geothermal systems. *Geothermics*, v.5, p.41-50, 1977.

FOURNIER, R. O. *Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters*. Tokyo: United nations University, 1989. (United Nations University-Geothermal Training Program Reports , n.10.)

FRAGA, G. C. *Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná*. 1986, 132 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências-Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

FREITAS, M. A. de; CAYE, B. R.; MACHADO, J. L. F. *Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina*. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI. 2002.100 p. (Projeto Oeste de Santa Catarina)

FREITAS, M. A. de; DIAS, A. de A.; CALDASSO, A. L.; VIERO, A. P. O magmatismo Serra Geral no oeste de Santa Catarina: uma nova divisão. In: ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: Escudo e Bacias, 1., 2003, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ILEA/UFRGS, 2003. 219 p.

FREITAS, M. A. ; LOPES, R. C. ; GOFFERMANN, M. ; TREIN, H. A. ; GASPARINI, C. Utilização da camada Candiota como guia para prospecção de água subterrânea em Candiota e Hulha Negra- RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. *Anais...* Natal: ABAS, 2008. 1 CD ROM.

FREITAS, M. A. de; ROISENBERG, A.; CUNHA, G. G. da. Caracterização hidrogeoquímica preliminar das fontes termais da região do Alto Rio Uruguai-RS e SC . In: Congresso brasileiro de geoquímica, 13., 2011, Gramado, RS. *Anais...* Gramado, RS: SBGq, 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 Sistema Aquífero Serra Geral no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2012. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, RBRH, Porto Alegre, RS, v. 17, n. 2, p. 31-41, 2012.

GASTMANS, D. *Hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na porção ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná*. 2007, 194 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

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.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. *Applied Geochemistry*, v.25, p. 16-33, 2010.

GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H. K.; MARMISOLLE, J.; OLEAGA, A. Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do corredor termal do rio Uruguai (Argentina – Brasil – Uruguai). *Geociências*, São Paulo, UNESP, v. 29, n. 1, p. 105-120, 2010.

GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY - GEF. *Síntese Hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani*.s.l., 2009. 105 p. (Série Manuais e Documentos técnicos do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani).

GOMES, A. J. L. *Avaliação de recursos geotermiais da Bacia do Paraná*.2010. 186 f. Tese (Doutorado).Observatório Nacional-ON, Rio de Janeiro. 2010.

GOMES, O. V. de O.; AIRES, J. R.; MARQUES, E. D.; SILVA-FILHO, E. V. Análise da salinidade dos aquíferos na Bacia do Macacu, Itaboraí, RJ, Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 27, n.2, p. 01-15, 2013. Disponível em:<<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27375>>. Acesso em: 06 maio 2016.

HAUSMAN, A. *Províncias hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul,RS*. São Leopoldo, RS: Unisinos , 1995. 127 p. 1 mapa. Escala 1:50.000, 1995. (Acta Geológica Leopoldensia, Série Mapas, v. 2).

HEM, J. D. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Alexandria: United States Geological Survey, Department of the Interior,1985... 264 p.

HINDI, E.C. *Hidroquímica e Hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná*. 2007. 154 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) -Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HOUNSLOW, Arthur W. *Water Quality Data. Analysis and Interpretation*. Lewis Publishers, 396 p. 1995.

HURTER, S. J.; ESTON, S.M.; e HAMZA, V. M.*Coleção Brasileira de Dados Geotérmicos*.São Paulo: IPT, 1983. 111p. (Série 2 – Fontes Termiais. Publicação n.. 1233)

IAEA-International Atomic Energy Agency, *Isotope Hydrology Information System, the ISOHIS Database*, 2004. Disponível em : <<http://isohis.iaea.org>>.

KIMMELMANN, A. A. *Environmental isotope and hydrochemical investigation of Bauru and Botucatu groundwaters, Parana basin, Brazil*. São Paulo: USP, IG, CEPAS. 1991. 21 p. (Report covering)

KIMMELMANN, A. A. *et al.* Isotopic study of the Botucatu aquifer system in the Brazilian portion of the Parana basin. *International Organism of Atomic Energy*, Viena, p.51-71, 1989.

LANDIM, P.M.B. *Análise estatística de dados geológicos*. 2a ed. São Paulo, UNESP, 2003. 253p.

LANDIM, P.M.B. 2010. Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. Rio Claro: UNESP. 2010. Disponível em:<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

LEBAC-LABORATÓRIO DE ESTUDOS DE BACIAS. *Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani: informe final de hidrogeologia*. Rio Claro, 2008. 127 p. (Relatório Final – Consórcio Guarani)

LISBÔA, N. A. *Fácies, estratificação hidrogeoquímica e seus controladores geológicos em unidades geológicas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul*. 1996. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

LOPES, R. S. *Águas Minerais do Brasil-composição, valor e indicações terapêuticas*. Departamento nacional de Produção Mineral. Rio de Janeiro: Comissão Permanente de Crenologia, 1956. 149 p. (Publicação n° 2)

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. Hidroquímica do aquífero Serra Geral no Oeste de Santa Catarina. In: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1., 2000. *Anais..* Fortaleza, 2000.

MACHADO J. L. F.; FREITAS M. A. de; CAYE, B. R. Evolução hidrogeoquímica dos aquíferos no oeste catarinense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis *Anais...* Florianópolis: ABAS, 2002. 1 CDROM

MACHADO, J. L. F. *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do sistema aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. 2005. 225 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar)-Centro Tecnológico, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2005.

MACHADO, J. L. F.. *Mapa hidrogeológico do Estado de Santa Catarina*. Porto Alegre: CPRM, 2013. 1 CD-ROM. Escala 1:500.000. Cartas Hidrogeológicas Estaduais. Programa Disponibilidade Hídrica no Brasil.

MACHADO, R. ; ROLDAN, L. F.; JACQUES, P. D.; FASSBINDER, E.; NUMMER, A. R. Tectônica Transcorrente mesozoica-cenozoica no Domo de Lages - Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 4, p. 799, 2012.

MANZANO, M.; GUIMARAENS, M. *Estudio del Origen de la Composición Química de las Aguas Subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní (SAG)*.Montevideo: Consórcio Guaraní, 2008.120p. (Informe Técnico)

MARQUES, J. M.; GRAÇA, H.; EGGENKAMP, H. G. M.; CARREIRA, P. M.; MAYER, B.; NUNES, D. Contribuição de traçadores geoquímicos e isotópicos para a avaliação das águas termais das Caldas da Rainha. *Comunicações Geológicas* ,v.99, n.2, p.43-51, 2012.Disponível em:  
<<http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/125>>. Acesso em:09 maio 2016..

MILANI, E. J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do gondwana sul-ocidental*.1997. 254 f. Tese(Doutorado em Ciências)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 1997.

MOCELLIN, R. C.; FERREIRA, F. J. F. Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guaraní no sudoeste do Estado do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v.39, n.3, p. 567-579, 2009.

MOHR, W. *Composição química de águas minerais do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria de Estado dos Negócios da Agricultura, Indústria e Comércio,1936. 46 p. (Boletim nº 44).

MONTAÑO J., TUJCHNEIDER O., AUGE M., FILI M., PARIS M., D'ÉLIA M., PÉREZ M., NAGY M. I., COLLAZO P., DECOUD P. *Acuíferos regionales en America Latina*. Sistema Acuífero Guaraní: capítulo Argentino–Uruguayo. Centro de Publicaciones. Secretaría de Extensión. Universidade Nacional del Litoral. Santa Fé, 217 p, 1998.

NANNI, A. S. *O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul : origem e condicionamento geológico* 2008. [127 f.] Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2008.

NOLLA, Frederico Ramalho. *Utilização de geotermômetro no monitoramento de temperatura de reservatório de petróleo, submetidos a injeção cíclica de vapor*. 1995. 1 v. Dissertação (Mestrado). Universidade de Campinas, Campinas, 1995.

NOMURA, Sara Ferreira. *Hidrotermalismo evidenciado por minerais autigênicos e inclusões fluídas da Formação Teresina, Bacia do Paraná*. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo., São Paulo, 2012.

OLIVEIRA, L. A. *O Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs*. 2009. 188 f. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Brasília, 2009.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Análise da distribuição dos parâmetros físico-químicos das águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de Goiás, Brasil. *Revista Caminhos de Geografia*, Uberlândia v. 12, n. 37 p. 21–30, 2011.

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 magneto telúricos. In: SIMPOSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOFISICA, 6, out. 2014, Porto Alegre. *Resumos Expandidos....* Porto Alegre: SBGf, 2014. 1 CD ROM.

PIRLO, M.C. Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal groundwaters from the Birdsville Track Ridge, Great Artesian Basin, South Australia. *Geothermics*. v. 33, p. 743-774, 2004.

RAMOS, A. N.; FORMOSO, M. L. L. Argilominerais das rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Rio de Janeiro: PETROBRAS, CENPES, DINTEP, 1975.. 72 p.

REBOUÇAS, A.C.; FRAGA, C.G. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. *Revista Água Subterrânea*, n.12., p 30-55, 1988.

REGINATO P. A. R. *Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da Bacia Hidrográfica Taquari–Antas (RS)*. 2003. 254 f Tese (Doutorado), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. 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, p. 50-59, 2006.

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. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27061>>.Acesso em:15 maio 2015.

ROSA FILHO, E. F.; SALAMUNI, R.; BITTENCOURT, A. V. L. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no Estado do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, n.37,p.22-52, 1987.

ROSA FILHO, E. F. da; FORLIN, M.; XAVIER, J. M. Informações básicas sobre a distribuição do sistema aquífero Guarany nas regiões sul e sudeste do Brasil. *A Água em Revista*, Belo Horizonte, v. 6, n.10 , p. 23-26, 1998.

ROSA FILHO, E.F. da; 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*, São Paulo, v.17, p. 91-111, 2003.

ROSA FILHO, E.F.; BITTENCOURT, A.V.L., HINDI, E.C., ARAVENA, R. Caracterização Hidroquímica do Aquífero Guarani na porção Centro-Norte do Estado do Paraná,Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, v. 19, n° 1, p. 87-94, 2005.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patters in modern global precipitation, In: Swart, P. K. ; Lohmann, K. C.; MacKenzie, J.; Savin, S. (ed.) *Climate Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph Series*, 78, pp. 1-36, AGU, Washington, DC, 1993.

SANTAANA, H. DE; VEROSLAVSKY, G.; FÚLFARO, V.J.;FERNÁNDEZ GARRASINO, C.A. *Síntesis sobre la Geología regional del Sistema Acuífero Guaraní*. Montevideo, 2009. 115 p.(Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani - Informe Técnico PSAG).

SCHEIBE, L. F.; HIRATA, R. C. A.. O contexto tectônico dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal-RN. *Anais...* Natal: ABAS, 2008.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais ...* Porto Alegre : SBG , 1974. v. 1, p.41-65.

SCHUCK, M. T. O; LISBOA, N.A.; EICK, N.C. Análise e interpretação lito-estrutural de imagens. Uma aplicação do conceito multi”na faixa metamórfica ao sul de Santana da Boa Vista-RS. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO,6., 1986, Gramado, RS. . *Anais...* Gramado-RS:SELPER, 1986. p.447-452.

SILVA, R. B. G. *Estudo Hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo*. 1983. 133 f. Tese (Doutorado em Geologia)-Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1983.

SILVA, A. B.; FERREIRA, F. J. F. Compartimentação magnética-estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região central do estado do Paraná, sul do Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY 10., 2007, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBGf, 2007.

SILVERMAN, B.W. *Density estimation for statistics and data analysis*. London: Chapman and Hall, 1986. (Monographs on Statistics and Applied Probability). Disponível em: <<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March02/Silverman/paper.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2015.

SOARES, P.C.; BARCELOS, P.E.; CSORDAS, S.M. *Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná*. São Paulo: Relatório RT-342/82-PAULIPETRO-Consórcio CESP/IPT, 1982.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; HOLZ, M. Heterogeneidades hidroestratigráfica no Sistema Aquífero Guarani. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.38, n.4, p.598-617, 2008.

SOARES, A. P. ; SOARES, P. C. ; BETTU, D. F. ; HOLZ, M. Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. *Geociências*, São Paulo, v. 26, p. 297-311, 2008.

SOUZA, A. A. *Caracterização da Bacia do Rio Iguaçu, a jusante do município de Reserva do Iguaçu, como área de descarga do Aquífero Guarani*. 2004. 92 f Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra)- Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, n.10, p.643 – 655, 2002.

SPILLER, L. E. As águas minerais alcalinas de Termas de Ibirá (SP): Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica. *Revista Geociências UNESP*, São Paulo, v. 17, n.2, 1998.

SUDERHSA. Plano Estadual de Recursos Hídricos. *Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas*. s.l.: s.n., 2007. 123p.

TEISSEDRE, J.M.; BARNER, U. Comportamento geotérmico e geoquímico das águas do Aquífero Botucatu na Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, n. 4 p. 85-95, 1981.

TUKEY, J. W. *Exploratory data analysis*. Reading, MA : Addison-Wesley, 1977.

WILDNER, W.; HARTMANN, L. A.; CUNHA-LOPES, R. A proposed stratigraphy for the Serra Geral Group in the Paraná Basin. In: MILANI, E.J., CHEMALE JR., F. (Ed.). *Correlation Brazil-Africa*. Gramado, RS: PETROBRAS, 2009.

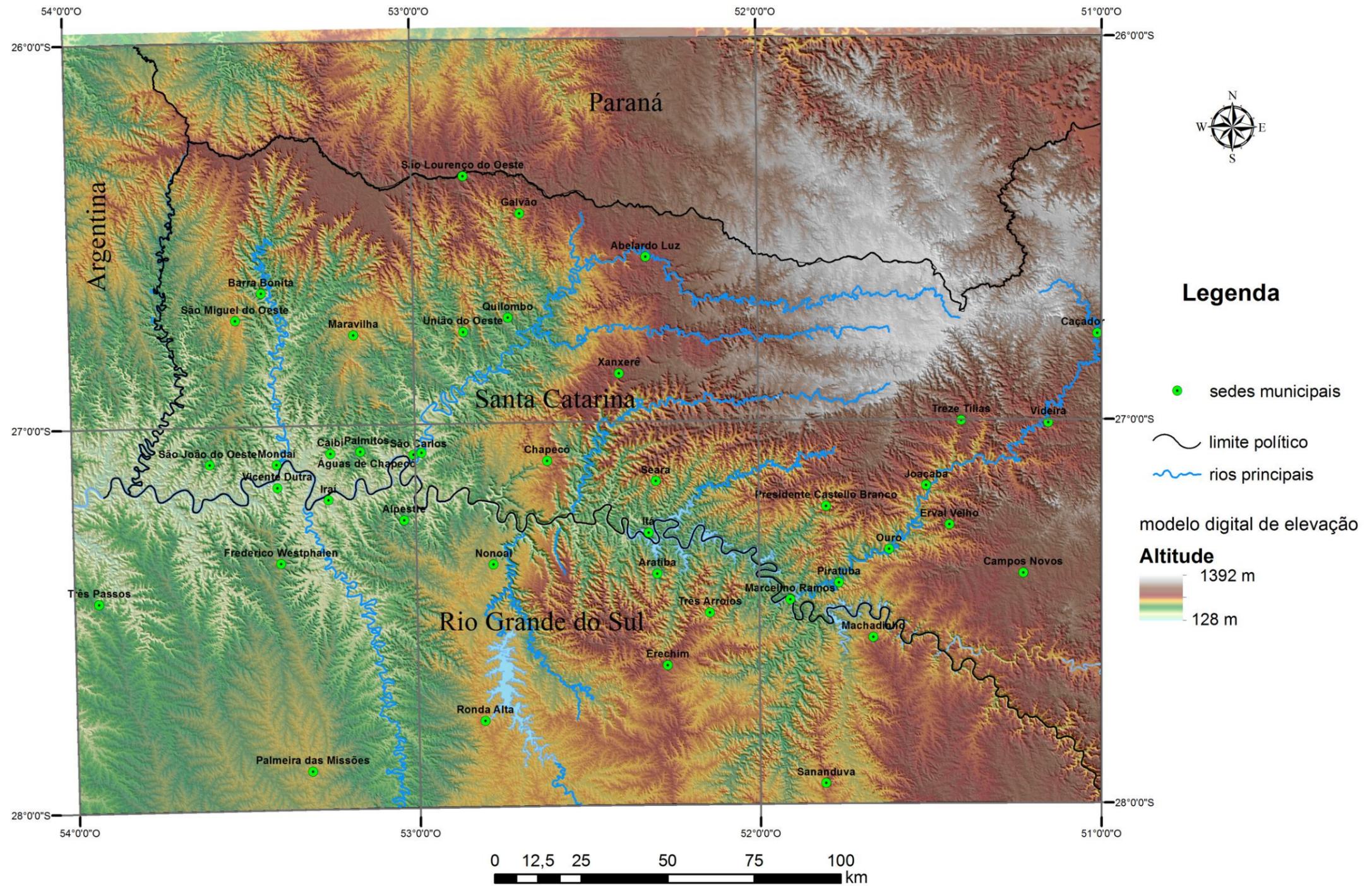
ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; NETO, E.V.S.; CERQUEIRA, J.R.; ZANOTTO, O.A. , PAUMER, M.L.; MARQUES, A. *Análise da Bacia do Paraná*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1986. 5v. (Relatório Interno da Petrobrás. Depex/Cenpes nº 1035-5765).

ZALÁN, P.V.; ASTOLFI, M.A.M; VIEIRA, L.S; CONCEIÇÃO, J.C.J; APPI, V.T; NETO, E.V.S.; CERQUEIRA. J.R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M.W.; ; KOLATA ;D.R.;; OLTZ, D.F.;; EIDEL, J.J. (Ed.), *Interior Cratonic Basins*. AAPG Memoir, Tulsa: v. 51, p. 681-708, 1990.

ZANATTA, L. C.; COITINHO, J. B. L. Utilização de poços profundos no Aquífero Guarani para abastecimento público em Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2004, Cuiabá. MT. *Anais...* Cuiabá: ABAS, 2004.

## **ANEXOS**

Anexo I- Principais cidades citadas no texto e modelo digital do terreno da área de estudo.



anexo II- Informações dos poços utilizados na pesquisa.

poço n°	Sigla	Local	Município	UF	Aquífero	Profundidade (m)	Entrada d'água (m)	Espessura do Confinamento (m)	Nível Estático (m)	latitude decimal	longitude decimal	cota(m)	Nível Potenciométrico (m)	temperatura da água (°C)
1	AC-AF	Linha Águas Frias fonte	Águas de Chapecó	SC	SASG					-27,0453	-52,9544	258	258	22,00
2	ACHDO-1	Balneário Hidroeste	Águas de Chapecó	SC	SASG				0	-27,0800	-52,9886	230	240	31,00
3	ACHDO-2	Balneário Hidroeste	Águas de Chapecó	SC	SASG				0	-27,0800	-52,9886	230	240	33,00
4	JA-982	Linha Farinhas	Alpestre	RS	SASG	137			27,6	-27,1860	-53,1550	250	222,4	20,20
5	BRB-11	Linha Beira Rio	Barra Bonita	SC	SASG	104	83		0	-26,6474	-53,4216	301	301	23,00
6	BRB-17-F	Águas do Araçá	Barra Bonita	SC	SASG					-26,6242	-53,4126	320	320	24,00
7	IU-990	Linha Beira Rio	Barra Bonita	SC	SASG	132			0	-26,6523	-53,4287	369	369	22,00
8	FONTE CAIBI	Camping Fonte Água Mineral	Caibi	SC	SASG					-27,0736	-53,2339	240	240	18,00
9	JQ-183	Barra do Leão	Campos Novos	SC	SAG	296		295	-47,7	-27,3105	-51,5617	496	543,7	30,00
10	Cascata Nazzari	Balneário	Erechim	RS	SAG	870		798	74	-27,6854	-52,1739	624	518	35,40
11	ERE-019-COR	Distrito Industrial	Erechim	RS	SAG	929		868	192,6	-27,6777	-52,2380	668	474,4	32,40
12	IO-358	Posto Incatol	Estação	RS	SASG					-27,9117	-52,2650	704	704	20,30
13	FF-IR	Linha Russa Fonte	Iraí	RS	SASG					-27,2137	-53,2475	213		20,00
14	OCF	Balneário Osvaldo Cruz Fonte	Iraí	RS	SASG					-27,1970	-53,2461	218		33,00
15	IV-163	Horto Florestal	Itá	SC	SAG	511,4		369	106,7	-27,2760	-52,3582	463	309,3	30,00
16	IV-201	Parque Termas de Itá	Itá	SC	SAG	924		487,5	172,15	-27,2778	-52,3347	469	296,85	29,80
17	IH-941	Balneário Termas de Machadinho	Machadinho	RS	SAG	983		817	197,5	-27,5864	-51,6605	720	560,5	42,00
18	JP-712	Poço Profundo CASAN	Maravilha	SC	SAG	1305		1223	235,24	-26,7609	-53,1739	571	335,8	50,00
19	2-MR-1-RS	Balneário Termas de Marcelino Ramos	Marcelino Ramos	RS	SAG	800		535	-270	-27,5030	-51,9010	367	637	36,70
20	IU-871	Linha Laju	Mondaí	SC	SASG	97	48,0; 60,0		14,35	-27,0705	-53,4259	207	192,65	21,00
21	JQ-184	Balneário Termas de Ouro	Ouro	SC	SAG	516		499	-70	-27,3115	-51,6204	503	573	32,90
22	F02-CPRM 901	Thermas Ilha Redonda fonte 2	Palmitos	SC	SASG					-27,1577	-53,0780	221		36,00
23	IR-900	Thermas Ilha Redonda poço	Palmitos	SC	SASG	151	133;141,6		0	-27,1563	-53,0770	251		37,00
24	IR-902	Thermas Ilha Redonda fonte 1	Palmitos	SC	SASG					-27,1583	-53,0784	230		36,00
25	IR-854	Linha Passarinho	Palmitos	SC	SASG	83			11,4	-27,1733	-53,2161	205		22,00
26	IR-862	Linha Taquaruçu fonte	Palmitos	SC	SASG					-27,1791	-53,2948	202	202	31,00
27	IV-882	Balneário	Piratuba	SC	SAG	700		539	-71	-27,4261	-51,7840	441	508	38,00
28	JP-711	Linha São Luis	Presidente Castelo Branco	SC	SAG	702		520	62	-27,2043	-51,8022	575	518	34,00
29	IN-502	Poço Valdir Horn	Quilombo	SC	SASG	52	30		0	-26,7297	-52,7185	382	382	37,00
30	IN-503	Balneário das Águas poço 1	Quilombo	SC	SASG	48,5	48		0	-26,7271	-52,7186	388	388	33,00

Anexo II- Informações dos poços utilizados na pesquisa. continuação

poço n°	Sigla	Local	Município	UF	Aquífero	Profundidade (m)	Entrada d'água (m)	Espessura do Confinamento (m)	Nível Estático (m)	latitude decimal	longitude decimal	cota(m)	Nível Potenciométrico (m)	temperatura da água (°C)
31	IN-504	Balneário das Águas poço 2	Quilombo	SC	SASG	63			0	-26,7271	-52,7186	388	388	32,00
32	IN-474	AARA-Associação Atlética Recreativa Alfa	Quilombo	SC	SASG					-26,7582	-52,7034	359	359	22,00
33	IR-931	Linha Cambucica	Riqueza	SC	SASG	180			1	-26,9767	-53,3333	252		21,00
34	IR-848	UNOESC Piscicultura	São Carlos	SC	SASG	34			0	-27,0748	-53,0500	240	240	26,00
35	TP2-SC	Termas do Prata poço 2	São Carlos	SC	SASG	174				-27,0761	-53,0513	229	229	29,00
36	TP1-SC	Termas do Prata poço 1	São Carlos	SC	SASG	129	117		0,15	-27,0789	-53,0533	239		36,00
37	TPG	Termas do Prata poço SAG	São Carlos	SC	SAG	852		740	-30	-27,0765	-53,0514	235	265	38,00
38	IV-986	Linha Ervalzinho-Associação Felipe Shoeninger	São João do Oeste	SC	SASG	124			62,2	-27,0859	-53,6398	289	226,8	22,00
39	S-236-BR-SJ	Termas São João	São João do Oeste	SC	RR	1376		1267	89,4	-27,0987	-53,5918	305	215,6	53,00
40	JP-714	ETA Linha Pres. Juscelino poço profundo	São Lourenço do Oeste	SC	SAG	1560		1462	178,9	-26,4002	-52,8965	702	523,1	57,00
41	JP-709	CASAN captação	Seara	SC	SAG	588		480	213	-27,1414	-52,3068	479	318	30,00
42	SGAR	Sgarbossa Materiais de Construção Ltda	Seara	SC	SASG					-27,1579	-52,3150	448	448	19,00
43	AGRODANIELI	São Domingos	Tapejara	RS	SAG	968		960	93,2	-28,0929	-52,0634	617	523,8	41,20
44	Bom Gosto	Bom Gosto Laticíneos	Tapejara	RS	SAG	654		960	168	-28,0560	-51,9954	654	486	42,30
45	Termas 3 ARR	Termas Três Arroios Poço Termal	Três Arroios	RS	SAG	1000		480	160,1	-27,4958	-52,1544	536	375,9	32,00
46	JP-354	Laticíneos Tirol - Linha Caçador	Treze Tilias	SC	SAG	597		400	177,3	-26,9706	-51,4586	850	672,7	27,20
47	IN-710	Barra do Europa	União do Oeste	SC	SASG	150			0	-26,8096	-52,9053	353	353	20,00
48	IN-701	Linha Santo Antonio do Meio	União do Oeste	SC	SASG	210			12,8	-26,7908	-52,8303	375	362,2	19,00
49	JQ-515	Linha Ferminão	Vicente Dutra	RS	SASG	100	12,00; 24,00; 48,00		5,8	-27,1754	-53,3157	212	206,2	21,00
50	JQ-526	Linha Burro Branco	Vicente Dutra	RS	SASG	100				-27,1241	-53,3892	203	203	21,90
51	JQ-499	CORSAN	Vicente Dutra	RS	SASG	85,5	68		17,26	-27,1658	-53,4024	220	202,74	22,00
52	JQ-523	Linha Intendência	Vicente Dutra	RS	SASG	100			54	-27,1087	-53,3644	249	195	21,00
53	JQ-528	Linha Pão de Açucar	Vicente Dutra	RS	SASG	204	120,0; 203,0			-27,1624	-53,4592	208	208	24,00
54	JQ-504	Balneário Municipal do Prado Poço	Vicente Dutra	RS	SASG					-27,1663	-53,4057	200	200	34,00
55	JQ-532	Balneário Águas do Prado	Vicente Dutra	RS	SASG	155				-27,1697	-53,4077	212	212	23,00
56	VDF	Balneário Municipal do Prado Fonte	Vicente Dutra	RS	SASG					-27,1671	-53,4063	200	200	32,00
57	JQ-514	Barra do Perau	Vicente Dutra	RS	SASG	105	16,0; 21,0; 25,0		9	-27,2137	-53,3268	200	191	21,00
58	JQ-525	Linha Rocha	Vicente Dutra	RS	SASG	114	90,0; 110,0			-27,1150	-53,3889	213	213	23,00

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa.

Poço nº	Sigla	pH	Condutividade elétrica (uS/cm)	dados em mg/L														
				Alcalinidade Total	Ca <sup>2+</sup>	Cl	Dureza Total	Fe total	F <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sais totais dissolvidos
1	AC-AF	8,83	1700,00	194,90	4,00	215,00	13,90	0,005	1,93	0,090	0,970	0,005	0,10	0,005	13,70	340,00	318,00	1011,00
2	ACHDO-1	8,93	1380,00	179,80	3,20	136,80	8,90	0,005	1,84	0,080	0,025	0,005	0,10	0,005	14,20	220,00	197,80	682,00
3	ACHDO-2	8,88	1420,00	183,80	3,20	151,50	7,90	0,005	1,85	0,070	0,025	0,005	0,10	0,005	14,80	268,00	318,00	860,00
4	JA-982	7,63	1850,00	69,70	108,20	220,00	346,00	0,871	2,11	0,025	18,500	0,13	0,10	2,000	47,60	95,00	289,50	899,00
5	BRB-11	9,05	990,00	69,30	5,60	17,60	14,00	0,005	1,18	0,126	0,025	0,005	0,10	0,005	41,60	165,00	245,80	443,00
6	BRB-17-F	8,90	870,00	84,20	4,80	29,30	12,00	0,005	0,85	0,131	0,025	0,005	0,10	0,005	34,60	150,00	179,00	400,00
7	IU-990	9,60	950,00	58,40	5,60	39,10	14,00	0,005	1,14	0,121	0,050	0,005	0,10	0,005	38,50	166,00	277,10	509,00
8	FONTE CAIBI	8,20	2880,00	121,80	29,40	229,60	90,00	0,008	1,42	0,206	4,060	0,01	0,10	3,000	30,80	540,00	808,30	1731,00
9	JQ-183	9,50	640,00	146,50	1,60	25,20	4,00	0,014	1,23	0,025	0,025	0,005	0,10	0,316	24,80	104,20	49,00	253,00
10	Cascata Nazzari	8,17	2360,00	562,60	7,20	138,60	22,00	0,104	5,91	0,025	1,000	0,01	0,10	2,000	16,60	420,00	171,50	1100,00
11	ERE-019-COR	9,33	2280,00	138,40	9,60	168,30	28,00	0,028	1,68	0,025	1,000	0,005	1,10	0,005	23,00	300,00	200,50	788,00
12	IO-358	6,98	400,00	124,00	36,90	12,50	202,00	0,005	0,15	0,025	22,000	0,005	5,28	0,005	53,30	9,00	30,00	214,00
13	FF-IR	8,55	2240,00	256,60	4,80	259,00	29,70	0,005	2,91	0,025	4,330	0,005	0,10	0,005	17,90	420,00	373,60	1237,00
14	OCF	8,56	2360,00	244,40	5,60	259,00	35,60	0,005	2,47	0,025	5,270	0,005	0,10	0,005	17,50	400,00	366,70	1203,00
15	IV-163	9,10	1300,00	183,20	3,20	87,90	8,00	0,005	0,96	0,121	0,025	0,005	0,10	0,005	17,30	240,00	201,20	660,00
16	IV-201	9,03	1410,00	171,70	2,40	110,40	8,00	0,032	1,31	0,025	0,500	0,01	0,10	1,000	13,70	260,00	186,00	678,00
17	IH-941	8,65	1990,00	596,00	2,40	49,50	6,00	0,005	6,00	0,025	0,025	0,01	0,10	0,005	21,00	340,00	141,80	918,00
18	JP-712	9,40	590,00	100,00	1,60	24,40	4,00	0,005	0,95	0,116	0,025	0,005	0,10	0,005	40,27	85,00	70,90	274,00
19	2-MR-1-RS	8,54	1850,00	510,10	2,40	87,10	8,00	0,040	4,83	0,025	0,500	0,01	0,10	0,005	16,10	300,00	132,50	829,00
20	IU-871	8,84	1890,00	17,80	159,50	136,80	390,00	0,019	2,52	0,131	0,050	0,005	0,10	0,005	28,20	160,00	631,20	1141,00
21	JQ-184	9,58	630,00	157,60	0,80	26,20	2,00	0,017	1,15	0,025	0,025	0,005	0,10	0,318	23,00	94,42	44,50	254,00
22	F02-CPRM 901	8,63	2090,00	173,70	7,10	195,40	19,80	0,005	1,68	0,090	0,025	0,005	0,10	1,000	15,10	380,00	408,30	1113,00
23	IR-900	8,63	2140,00	174,70	5,60	224,80	17,80	0,005	1,76	0,090	0,950	0,005	0,10	0,005	14,00	400,00	380,60	1133,00
24	IR-902	8,46	2060,00	174,70	6,30	190,50	17,60	0,005	1,70	0,070	0,025	0,005	0,10	1,000	15,10	360,00	380,60	1060,00
25	IR-854	8,68	1380,00	139,40	8,70	92,80	25,70	0,079	1,54	0,150	0,950	0,005	0,10	0,005	20,80	260,00	338,90	807,00
26	IR-862	8,10	3540,00	133,30	25,40	288,30	118,80	0,005	1,59	0,025	13,500	0,03	0,10	3,000	18,20	600,00	1019,40	2049,00
27	IV-882	8,56	1690,00	422,80	3,20	127,00	8,00	0,005	2,34	0,126	0,025	0,005	0,10	0,005	20,10	340,00	159,00	905,00
28	JP-711	9,06	1280,00	284,50	2,40	92,80	10,00	0,005	1,27	0,137	1,000	0,005	0,10	0,005	20,40	240,00	197,20	704,00
29	IN-502	8,75	880,00	118,80	3,20	87,90	9,80	0,005	1,64	0,025	0,025	0,005	0,10	0,005	20,40	140,00	95,70	420,00
30	IN-503	8,77	900,00	118,80	4,80	87,90	12,00	0,005	1,61	0,025	0,025	0,005	0,10	0,005	19,50	140,00	90,80	416,00
31	IN-504	8,81	880,00	117,80	3,20	87,90	9,80	0,005	1,62	0,025	0,025	0,005	0,10	0,005	19,00	140,00	92,90	415,00
32	IN-474	7,70	620,00	85,10	4,00	58,60	11,80	0,076	1,00	0,025	2,160	0,005	0,29	0,005	20,10	80,00	67,90	285,00
33	IR-931	8,92	1380,00	75,20	8,70	92,80	30,00	0,005	2,83	0,131	1,990	0,005	0,83	0,005	47,96	260,00	350,00	820,00
34	IR-848	9,00	950,00	112,10	4,00	92,80	11,90	0,005	1,59	0,150	0,025	0,005	0,10	0,005	15,50	160,00	146,40	408,00
35	TP2-SC	8,93	1070,00	114,10	4,00	92,80	9,90	0,005	1,60	0,090	0,025	0,005	0,10	0,005	14,60	160,00	165,80	507,00
36	TP1-SC	8,81	1450,00	138,40	4,80	136,80	11,80	0,005	1,77	0,070	0,025	0,005	0,10	0,005	14,80	240,00	311,00	792,00
37	TPG	8,79	1600,00	164,60	4,00	141,70	11,80	0,005	1,80	0,080	0,025	0,005	0,10	0,005	15,30	280,00	345,00	887,00

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa. *continuação*

Poço nº	Sigla	pH	Condutividade elétrica (uS/cm)	dados em mg/L														
				Alcalinidade Total	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Dureza Total	Fe total	F <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sais totais dissolvidos
38	IV-986	8,01	2130,00	58,40	204,00	44,00	580,00	0,060	1,28	0,195	17,300	0,005	2,76	0,005	36,80	200,00	884,70	815,00
39	S-236-BR-SJ	7,40	6460,00	58,40	273,80	1544,00	800,00	0,039	0,93	0,121	45,400	0,12	0,10	13,000	39,40	980,00	1270,80	2440,00
40	JP-714	9,30	240,00	66,30	2,40	17,60	5,90	0,005	0,34	0,025	0,025	0,005	0,10	0,005	35,40	37,00	6,40	139,00
41	JP-709	9,36	780,00	181,20	3,20	29,30	8,00	0,005	0,75	0,121	0,025	0,005	0,10	0,005	23,90	91,00	6,50	289,00
42	SGAR	7,68	5020,00	33,70	535,70	1114,00	1380,00	0,059	0,75	0,142	10,700	0,01	2,43	0,005	25,90	400,00	706,90	2817,00
43	AGRODANIELI	8,22	2490,00	348,30	6,40	70,80	24,00	0,022	2,39	0,025	1,900	0,02	0,10	1,000	23,00	380,00	494,20	1189,00
44	Bom Gosto	8,28	2450,00	353,50	8,80	85,60	24,00	0,043	2,15	0,025	0,500	0,02	0,10	1,000	25,90	380,00	441,80	1158,00
45	Termas 3 ARR	8,33	2270,00	381,20	7,90	195,40	18,00	0,005	3,35	0,131	0,025	0,02	0,10	0,005	21,90	460,00	286,00	1203,00
46	JP-354	9,53	600,00	169,70	0,80	20,80	2,00	0,005	1,07	0,025	0,025	0,005	0,10	0,005	24,30	92,00	32,10	244,00
47	IN-710	8,30	7090,00	8,90	757,90	1392,50	1921,60	0,046	2,60	0,025	7,410	0,03	0,10	3,000	35,00	640,00	765,30	3484,00
48	IN-701	8,30	7310,00	10,90	571,40	1441,40	1686,30	0,008	2,53	0,285	63,300	0,01	0,10	2,000	18,60	900,00	1658,30	2590,00
49	JQ-515	8,40	850,00	121,20	17,50	66,50	95,00	0,005	0,82	0,480	12,500	0,16	0,10	0,005	50,90	165,00	318,00	688,00
50	JQ-526	8,00	1265,00	118,20	23,80	156,40	87,10	0,118	1,50	0,060	6,730	0,005	0,66	0,005	48,50	240,00	239,50	644,00
51	JQ-499	8,00	410,00	149,50	16,70	8,90	71,30	0,029	0,81	0,025	7,220	0,01	0,69	0,005	52,00	45,00	17,20	239,00
52	JQ-523	9,80	1910,00	27,30	94,50	131,90	237,00	0,936	5,33	0,025	2,260	0,005	0,22	0,005	23,00	210,00	488,30	857,00
53	JQ-528	8,80	2180,00	35,40	163,50	73,30	443,60	0,201	4,31	0,025	8,680	0,005	0,47	0,005	28,10	340,00	1206,90	1827,00
54	JQ-504	7,65	4560,00	126,30	82,50	552,10	239,60	0,041	2,63	0,025	8,190	0,07	0,10	5,000	23,70	600,00	936,00	2286,00
55	JQ-532	8,10	3560,00	152,50	59,50	439,70	186,10	0,006	2,26	0,025	9,140	0,04	0,10	4,000	30,30	640,00	783,30	2060,00
56	VDF	7,75	4120,00	134,30	77,00	522,80	221,80	0,005	2,76	0,025	7,220	0,005	0,10	5,000	24,60	720,00	1137,50	2572,00
57	JQ-514	7,98	3040,00	186,90	61,10	376,20	192,10	0,266	2,21	0,070	9,620	0,18	0,10	0,005	41,20	460,00	658,30	1721,00
58	JQ-525	8,97	3690,00	21,20	90,20	449,50	215,80	0,906	4,29	0,025	6,800	0,005	0,10	0,005	37,00	500,00	955,00	2053,00

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa. *continuação*

Poço nº	Sigla	dados em mg/L													
		Al	As	B	Ba	Br	Co	Cs	Cu	Ga	Ge	Li	Mo	Ni	Pb
1	AC-AF	0,020000	0,000900	0,562000	0,017730	0,324000	0,000030	0,000240	0,001900	0,000230	0,001660	0,064200	0,011500	0,000200	0,000050
2	ACHDO-1	0,019000	0,001500	0,473000	0,025560	0,212000	0,000010	0,000200	0,001400	0,000290	0,001810	0,043000	0,009400	0,000300	0,000100
3	ACHDO-2	0,018000	0,001500	0,484000	0,025850	0,250000	0,000040	0,000230	0,001300	0,000280	0,001820	0,045400	0,003500	0,000500	0,000050
4	JA-982	0,008000	0,000900	0,659000	0,042840	0,326000	0,000020	0,000160	0,002000	0,000070	0,000190	0,016000	0,010400	0,000100	0,000050
5	BRB-11	0,023000	0,005400	0,504000	0,005860	0,061000	0,000040	0,000010	0,002100	0,000130	0,000950	0,030400	0,010600	0,000100	0,000100
6	BRB-17-F	0,020000	0,009000	0,386000	0,011140	0,041000	0,000050	0,000300	0,001900	0,001160	0,001070	0,042600	0,007300	0,000100	0,000050
7	IU-990	0,018000	0,002000	0,289000	0,005410	0,057000	0,000030	0,000005	0,002200	0,000280	0,000440	0,011500	0,015300	0,000100	0,000050
8	FONTE CAIBI	0,018000	0,001900	0,925000	0,009800	0,417000	0,000080	0,000800	0,005900	0,000060	0,001870	0,148500	0,014600	0,000300	0,000100
9	JQ-183	0,021000	0,002400	0,176000	0,009950	0,058000	0,000010	0,000160	0,041400	0,002170	0,001750	0,030100	0,003900	0,001000	0,007700
10	Cascata Nazzari	0,017000	0,002500	0,333000	0,016180	0,169000	0,000040	0,000350	0,006500	0,000190	0,001120	0,072700	0,019600	0,003500	0,000600
11	ERE-019-COR	0,057000	0,001700	0,411000	0,090560	0,276000	0,000010	0,000440	0,003200	0,001570	0,000250	0,078600	0,008600	0,000200	0,000100
12	IO-358	0,005000	0,000250	0,017000	0,016420	0,080000	0,000010	0,000020	0,001300	0,000025	0,000025	0,000400	0,000500	0,000600	0,000200
13	FF-IR	0,018000	0,003900	0,560000	0,019440	0,523000	0,000030	0,000330	0,002600	0,000220	0,001190	0,079700	0,005300	0,000200	0,000050
14	OCF	0,034000	0,002800	0,539000	0,029680	0,460000	0,000040	0,000370	0,002500	0,000190	0,001230	0,089300	0,013700	0,000400	0,001700
15	IV-163	0,014000	0,001400	0,354000	0,025800	0,109000	0,000020	0,000150	0,001200	0,000310	0,001430	0,052400	0,005000	0,000100	0,000050
16	IV-201	0,014000	0,001000	0,343000	0,019570	0,185000	0,000010	0,000190	0,001800	0,000310	0,001540	0,072500	0,006900	0,000400	0,000300
17	IH-941	0,017000	0,004500	0,376000	0,061120	0,083000	0,000020	0,000190	0,001500	0,000230	0,001610	0,070300	0,024800	0,000100	0,000100
18	JP-712	0,049000	0,005500	0,292000	0,017850	0,030000	0,000030	0,000100	0,001400	0,001630	0,000970	0,016300	0,003300	0,000200	0,000050
19	2-MR-1-RS	0,013000	0,003400	0,379000	0,056400	0,133000	0,000010	0,000100	0,001300	0,000290	0,001870	0,069800	0,015900	0,000200	0,000100
20	IU-871	0,022000	0,000600	0,474000	0,006590	0,141000	0,000080	0,000020	0,004100	0,000720	0,000130	0,007400	0,007300	0,000100	0,000050
21	JQ-184	0,036000	0,002100	0,162000	0,011500	0,046000	0,000010	0,000090	0,002500	0,001630	0,001500	0,025600	0,003600	0,000100	0,000500
22	F02-CPRM 901	0,017000	0,003900	0,624000	0,027650	0,321000	0,000020	0,000370	0,002900	0,000170	0,001750	0,079200	0,015100	0,000100	0,000100
23	IR-900	0,022000	0,003200	0,648000	0,027550	0,371000	0,000030	0,000370	0,003500	0,000170	0,002030	0,083000	0,016000	0,000700	0,000200
24	IR-902	0,058000	0,003800	0,602000	0,027060	0,317000	0,000090	0,000360	0,003200	0,000190	0,001770	0,077500	0,010700	0,000300	0,000200
25	IR-854	0,005000	0,002000	0,481000	0,006470	0,210000	0,000030	0,000220	0,002200	0,000070	0,001730	0,054300	0,008000	0,000100	0,000050
26	IR-862	0,021000	0,000250	0,135000	0,000600	nd	0,006000	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,006000	0,000050
27	IV-882	0,018000	0,001800	0,384000	0,069600	0,195000	0,000010	0,000130	0,000900	0,000310	0,002030	0,054700	0,005900	0,000100	0,000050
28	JP-711	0,018000	0,002300	0,310000	0,022260	0,127000	0,000030	0,000140	0,002000	0,000620	0,001980	0,055400	0,006100	0,000100	0,000200
29	IN-502	0,043000	0,001400	0,304000	0,006930	0,115000	0,000030	0,000380	0,000300	0,000940	0,001320	0,036100	0,002100	0,000100	0,000050
30	IN-503	0,020000	0,001600	0,306000	0,005920	0,119000	0,000010	0,000400	0,000800	0,000950	0,001250	0,035200	0,004800	0,000100	0,000050
31	IN-504	0,020000	0,001300	0,314000	0,006030	0,125000	0,000010	0,000390	0,000900	0,000980	0,001240	0,034100	0,005800	0,000200	0,000100
32	IN-474	0,347000	0,000800	0,206000	0,011280	0,095000	0,000080	0,000190	0,001400	0,000470	0,000790	0,028100	0,002800	0,000200	0,000050
33	IR-931	0,028000	0,000500	0,571000	0,007070	0,148000	0,000080	0,000020	0,002300	0,000310	0,000370	0,014100	0,005400	0,000300	0,000050
34	IR-848	0,027000	0,003300	0,455000	0,005820	0,119000	0,000030	0,000330	0,001700	0,000320	0,001030	0,034200	0,014600	0,000100	0,000050
35	TP2-SC	0,028000	0,003600	0,488000	0,005200	0,131000	0,000030	0,000300	0,001400	0,000390	0,001500	0,035300	0,019000	0,000100	0,000050
36	TP1-SC	0,025000	0,004300	0,522000	0,021880	0,210000	0,000030	0,000310	0,002100	0,000310	0,001830	0,048300	0,015200	0,000400	0,000050
37	TPG	0,014000	0,004100	0,554000	0,023290	0,220000	0,000040	0,000330	0,002300	0,000160	0,001900	0,051800	0,018400	0,000100	0,000100

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa. *continuação*

Poço n°	Sigla	dados em mg/L													
		Al	As	B	Ba	Br	Co	Cs	Cu	Ga	Ge	Li	Mo	Ni	Pb
38	IV-986	0,016000	0,000250	0,558000	0,001190	0,047000	0,000120	0,000005	0,004800	0,001070	0,000580	0,001600	0,010500	0,000100	0,000050
39	S-236-BR-SJ	0,025000	0,000250	0,069000	0,000250	0,050000	0,000010	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,003000	0,000100	0,000050
40	JP-714	0,076000	0,003900	0,077000	0,005780	0,050000	0,000010	0,000210	0,000500	0,001420	0,000370	0,006600	0,001700	0,000100	0,000050
41	JP-709	0,023000	0,002800	0,252000	0,012860	0,039000	0,000040	0,000110	0,001300	0,000890	0,001300	0,024500	0,008300	0,000500	0,000050
42	SGAR	0,005000	0,460000	0,103000	0,000250	nd	0,000010	nd	0,025000	nd	nd	nd	0,004000	0,105000	0,000050
43	AGRODANIELI	0,015000	0,004200	0,573000	0,024160	0,104000	0,000010	0,000290	0,003200	0,000110	0,001550	0,051500	0,014900	0,000100	0,000100
44	Bom Gosto	0,017000	0,004800	0,509000	0,028140	0,138000	0,000020	0,000560	0,005100	0,000120	0,001490	0,055900	0,014500	0,001700	0,000200
45	Termas 3 ARR	0,025000	0,001500	0,609000	0,047630	0,298000	0,000060	0,000720	0,003700	0,000350	0,001680	0,105800	0,011000	0,000800	0,000200
46	JP-354	0,024000	0,002500	0,177000	0,008000	0,040000	0,000010	0,000030	0,000400	0,001340	0,001860	0,023200	0,003500	0,000100	0,000050
47	IN-710	0,093000	0,000250	0,157000	0,033800	nd	0,027400	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,005000	0,066000	0,668000
48	IN-701	0,068000	0,000250	0,065000	0,000250	nd	0,004500	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,018000	0,022000	0,000050
49	JQ-515	0,005000	0,000250	0,238000	0,027720	0,170000	0,000030	0,000120	0,002300	0,000025	0,000510	0,017400	0,002800	0,000100	0,000200
50	JQ-526	0,010000	0,001300	0,408000	0,003510	0,330000	0,000020	0,000060	0,003300	0,000025	0,000520	0,057500	0,004400	0,000400	0,000300
51	JQ-499	0,016000	0,001900	0,038000	0,097290	0,031000	0,000120	0,000120	0,003400	0,000025	0,000460	0,007500	0,000050	0,000400	0,000300
52	JQ-523	0,015000	0,000250	1,104000	0,009380	0,299000	0,000010	0,000010	0,007900	0,000370	0,000100	0,006100	0,004300	0,000100	0,000200
53	JQ-528	0,039000	0,000250	0,126000	0,002700	nd	0,000010	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050
54	JQ-504	0,018000	0,248000	0,192000	0,005800	nd	0,000010	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050
55	JQ-532	0,039000	0,000250	0,114000	0,000250	nd	0,014100	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050
56	VDF	0,005000	0,086000	0,193000	0,000900	nd	0,000010	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050
57	JQ-514	0,048000	0,000250	0,106000	0,001200	nd	0,003100	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050
58	JQ-525	0,005000	0,000250	0,168000	0,000250	nd	0,002200	nd	0,000500	nd	nd	nd	0,000500	0,000100	0,000050

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa. <i>continuação</i>												
Poço n°	Sigla	dados em mg/L								razões isotópicas		
		Rb	Sc	Se	Sn	Sr	V	W	Zn	2H	18O	13C
1	AC-AF	0,001960	0,004000	0,000900	0,000070	0,253930	0,000400	0,003730	0,007700	-37,97	-6,44	-7,62
2	ACHDO-1	0,001750	0,003000	0,000800	0,000025	0,100740	0,000100	0,002620	0,008800	-38,48	-6,49	-8,17
3	ACHDO-2	0,001930	0,004000	0,000250	0,000025	0,099500	0,000200	0,001660	0,004200	-39,08	-6,58	-8,28
4	JA-982	0,002470	0,005000	0,000900	0,000025	0,256130	0,000200	0,001920	0,015300	-33,90	-5,53	-15,91
5	BRB-11	0,000570	0,005000	0,000250	0,000025	0,042270	0,005000	0,000880	0,012500	-38,32	-6,74	-8,38
6	BRB-17-F	0,001710	0,005000	0,000800	0,000200	0,101110	0,019700	0,000590	0,016100	-34,72	-6,64	-9,37
7	IU-990	0,000540	0,005000	0,000250	0,000160	0,042440	0,004900	0,000800	0,011700	-38,04	-6,71	-11,16
8	FONTE CAIBI	0,006990	0,004000	0,001100	0,000120	1,205740	0,005600	0,001630	0,009800	-35,05	-6,08	-9,84
9	JQ-183	0,000940	0,003000	0,000250	0,002320	0,053910	0,000100	0,001720	0,010200	-39,07	-6,66	-9,63
10	Cascata Nazzari	0,002460	0,000500	0,000250	0,000080	0,107190	0,002900	0,002720	0,023500	-34,34	-5,70	-4,67
11	ERE-019-COR	0,002500	0,000500	0,010600	0,000025	0,567230	0,079800	0,001860	0,011700	-36,78	-5,75	-10,46
12	IO-358	0,002300	0,005000	0,000250	0,000260	0,203500	0,006500	0,000330	0,014800	-30,91	-5,65	-16,33
13	FF-IR	0,003020	0,003000	0,001400	0,000100	0,174020	0,000800	0,000780	0,007100	-34,29	-6,07	-7,17
14	OCF	0,003070	0,004000	0,001200	0,000090	0,289000	0,000300	0,003190	0,008100	-34,96	-6,08	-7,18
15	IV-163	0,001090	0,002000	0,000250	0,000025	0,121660	0,000100	0,000600	0,007600	-39,15	-6,56	-8,86
16	IV-201	0,001410	0,001000	0,000250	0,000070	0,193090	0,000100	0,003230	0,013100	-44,09	-6,62	-8,94
17	IH-941	0,002390	0,002000	0,000250	0,000120	0,173110	0,000100	0,022710	0,010900	-38,53	-5,74	-3,98
18	JP-712	0,000940	0,008000	0,000250	0,000190	0,036050	0,001100	0,001220	0,017700	-38,30	-6,51	-8,62
19	2-MR-1-RS	0,002090	0,002000	0,000250	0,000025	0,127210	0,000100	0,013940	0,009800	-33,75	-5,77	-4,70
20	IU-871	0,000590	0,003000	0,000900	0,000110	0,376440	0,004700	0,002190	0,044700	-33,03	-5,93	nd
21	JQ-184	0,000520	0,003000	0,000250	0,000140	0,035910	0,000100	0,001640	0,003900	-40,20	-6,68	-9,64
22	F02-CPRM 901	0,003410	0,003000	0,001000	0,000130	0,363130	0,000200	0,003250	0,011300	-38,36	-6,54	-7,15
23	IR-900	0,003220	0,003000	0,000800	0,000060	0,360090	0,000300	0,003120	0,010200	-38,81	-6,34	-7,21
24	IR-902	0,003370	0,004000	0,000800	0,000090	0,355040	0,000400	0,002100	0,052900	-38,85	-6,58	-7,50
25	IR-854	0,002040	0,005000	0,000250	0,000460	0,128620	0,000200	0,002670	0,011900	-36,77	-6,23	-9,00
26	IR-862	nd	nd	nd	0,000000	0,197400	0,012000	0,000100	0,000250	-37,58	-6,56	-6,62
27	IV-882	0,001800	0,004000	0,000700	0,000280	0,142900	0,000200	0,003650	0,006500	-33,64	-5,87	-5,74
28	JP-711	0,001160	0,004000	0,000250	0,000230	0,210810	0,000300	0,002670	0,009200	-36,27	-6,27	-8,21
29	IN-502	0,002230	0,003000	0,000700	0,000260	0,075370	0,000100	0,001060	0,011300	-38,85	-6,63	-8,51
30	IN-503	0,002120	0,004000	0,000700	0,000100	0,073520	0,001300	0,002390	0,006400	-39,54	-6,64	-8,66
31	IN-504	0,002230	0,005000	0,000250	0,000350	0,078110	0,000400	0,002680	0,014500	-39,32	-6,62	-8,77
32	IN-474	0,001420	0,005000	0,000250	0,000070	0,090950	0,001200	0,000890	0,008500	-37,02	-6,39	-10,46
33	IR-931	0,001030	0,005000	0,002000	0,000070	0,039260	0,039700	0,000880	0,020000	-32,97	-6,01	-14,27
34	IR-848	0,001750	0,004000	0,000250	0,000060	0,091610	0,000600	0,004740	0,006300	-38,18	-6,43	-8,03
35	TP2-SC	0,001740	0,004000	0,000250	0,000025	0,103970	0,000200	0,004890	0,007500	-38,38	-6,65	-7,94
36	TP1-SC	0,002250	0,004000	0,000250	0,000070	0,232570	0,000200	0,003520	0,008900	-39,04	-6,68	-7,02
37	TPG	0,002140	0,003000	0,000250	0,000080	0,197240	0,000200	0,004170	0,008400	-39,40	-6,60	-6,72

Anexo III - Resultados analíticos das amostras de água utilizadas na pesquisa. <i>continuação</i>												
Poço n°	Sigla	dados em mg/L								razões isotópicas		
		Rb	Sc	Se	Sn	Sr	V	W	Zn	2H	18O	13C
38	IV-986	0,000460	0,005000	0,003800	0,000060	0,098960	0,312500	0,001000	0,093600	-28,63	-5,53	-13,09
39	S-236-BR-SJ	nd	nd	nd	nd	0,548700	0,018000	0,045100	0,000250	-32,57	-5,98	-4,86
40	JP-714	0,000860	0,007000	0,000250	0,000025	0,045380	0,000400	0,000350	0,006600	-41,05	-6,77	-10,41
41	JP-709	0,000750	0,003000	0,000250	0,000025	0,033630	0,000300	0,000360	0,014700	-35,95	-6,85	-9,94
42	SGAR	nd	nd	nd	nd	0,283600	0,000100	0,105000	0,425000	-34,35	-6,03	-17,08
43	AGRODANIELI	0,002670	0,002000	0,000250	0,000170	0,133430	0,000600	0,006890	0,012500	-39,20	-6,09	-4,92
44	Bom Gosto	0,003200	0,002000	0,000250	0,000480	0,124930	0,000500	0,007630	0,018500	-38,83	-6,20	-4,91
45	Termas 3 ARR	0,003870	0,003000	0,000600	0,000170	0,427510	0,004900	0,001030	0,022300	-23,97	-5,69	-5,26
46	JP-354	0,000410	0,002000	0,000250	0,000025	0,023970	0,002600	0,001500	0,010300	-39,39	-6,66	-10,37
47	IN-710	nd	nd	nd	nd	1,903400	0,108000	0,000100	0,000250	-24,16	-6,39	nd
48	IN-701	nd	nd	nd	nd	0,380200	0,000100	0,000100	0,000250	-28,75	-6,37	nd
49	JQ-515	0,002340	0,010000	0,000250	0,000120	0,109580	0,001000	0,000790	0,013200	-32,84	-5,44	-14,15
50	JQ-526	0,001120	0,010000	0,001100	0,000180	0,111850	0,011400	0,001050	0,027600	-31,19	-5,42	-16,76
51	JQ-499	0,001400	0,010000	0,005300	0,000200	0,142750	0,052900	0,000070	0,026100	-29,67	-5,23	-16,58
52	JQ-523	0,000840	0,005000	0,001200	0,000160	0,169700	0,039200	0,002350	0,037000	-35,73	-5,97	nd
53	JQ-528	nd	nd	nd	nd	0,072400	0,000100	0,000100	0,000250	-33,33	-6,00	-16,37
54	JQ-504	nd	nd	nd	nd	0,209700	0,000100	0,000100	0,000250	-35,97	-6,13	-7,11
55	JQ-532	nd	nd	nd	nd	0,140000	0,008000	0,000100	0,000250	-34,43	-5,93	-10,45
56	VDF	nd	nd	nd	nd	0,214000	0,000100	0,000100	0,000250	-36,27	-5,96	-8,22
57	JQ-514	nd	nd	nd	nd	0,047900	0,019000	0,000100	0,000250	-34,19	-5,89	-8,07
58	JQ-525	nd	nd	nd	nd	0,042000	0,000100	0,021200	0,000250	-37,07	-6,27	nd