

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO PRÉ-CAMBRIANO NO ESTADO DE SÃO PAULO

Diogo Alberto Roque

Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro (SP)

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

DIOGO ALBERTO ROQUE

HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO PRÉ-CAMBRIANO NO
ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Orientador: Dr. Didier Gastmans

Rio Claro - SP
2018

R786h Roque, Diogo Alberto
Hidroquímica do Aquífero Pré-Cambriano no Estado de São Paulo / Diogo Alberto Roque. -- Rio Claro, 2018
71 f. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Didier Gastmans

1. interação água-rocha. 2. hidroquímica. 3. aquífero pré-cambriano. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

DIOGO ALBERTO ROQUE

HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO PRÉ-CAMBRIANO NO
ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Dr. Didier Gastmans (orientador)

MSc. Ludmila Vianna Batista

MSc. Marina Lunardi

Rio Claro, ____ de _____ de _____.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

À Vó Cida
e minha mãe, Cristina.
Mais preciosas do que diamante.

“Não há nada tão real quanto um sonho e,
se você for atrás dele, algo maravilhoso acontecerá.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Didier por acreditar no potencial dos seus alunos, por me ensinar um pouco do que sabe e por sempre me receber em sua sala com muito bom humor, isso fez diferença.

Agradeço aos colegas de laboratório, o LARHIA (Laboratório de Recursos Hídricos e Isótopos Ambientais), pelo acolhimento e pelos ensinamentos compartilhados, em especial à Carol Quaggio, pela leitura minuciosa e atenta do relatório parcial que deu origem a este trabalho, pelas dicas e incentivos.

Agradeço às pesquisadoras que formaram a banca examinadora deste trabalho, Ludmila Batista e Marina Lunardi, pelo cuidado na avaliação e pelas importantes orientações.

Agradeço aos amigos geógrafos que enriqueceram minha caminhada ao longo destes anos, em especial ao Mion, por ser uma pessoa de coração tão grande, e ao Gentili, pela parceria em tantos anos de república.

Agradeço aos professores que tive até aqui. Foram eles que permitiram que o menino fascinado por vulcões se tornasse Geólogo.

Agradeço aos amigos por tornarem essa jornada mais leve.

Agradeço à minha família pelo amor.

Agradeço ao Universo pela vida.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	i
LISTA DE TABELAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	2
2 OBJETIVOS	3
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
3.1 Geologia regional	7
4 HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO	12
4.1 Modelo hidrogeológico conceitual do SAC	13
4.2 Propriedades hidráulicas e produtividade em rochas cristalinas	15
5 MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1 Levantamento de dados	18
5.1.1 Dados hidroquímicos	18
5.1.2 Dados geológicos	19
5.2 Tratamento dos dados	20
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
6.1 Análise do erro de balanço iônico	24
6.2 Composição química	24
6.3 Classificação hidroquímica	28
6.4 Análise de agrupamentos dos dados hidroquímicos	32
6.5 Interações água-rocha	33

6.5.1 Rochas silicáticas	33
6.5.1.1 Granitoide	34
6.5.1.2 Gnaisse	37
6.5.1.3 Filito	38
6.5.1.4 Migmatito	38
6.5.1.5 Mica xisto	38
6.5.1.6 Metarenito	39
6.5.1.7 Suíte Alcalina	39
6.5.2 Rochas carbonáticas	40
6.5.2.1 Mármore	40
7 CONCLUSÕES	42
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXO A - DADOS HIDROQUÍMICOS, HIDROGEOLÓGICOS E LITOLÓGICOS DE AMOSTRAS	49
APÊNDICE A - ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS	53
APÊNDICE B – RAZÕES IÔNICAS	55

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa de localização do embasamento cristalino no estado de São Paulo	4
Figura 2. Regiões hidrográficas de ocorrência no embasamento cristalino e suas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs)	5
Figura 3. Pluviogramas médios acumulados de estações na área de estudo	7
Figura 4. Os três grandes domínios geotectônicos do continente Sul-Americano e suas províncias estruturais	8
Figura 5. Compartimentação do Sistema Mantiqueira e seus domínios	10
Figura 6. Mapa e seção hidrogeológica dos aquíferos que ocorrem no estado de São Paulo	12
Figura 7. Modelo conceitual de circulação de água em aquífero cristalino	14
Figura 8. Espessura do manto inconsolidado sobre rochas cristalinas na área de estudo	14
Figura 9. Estruturas que permitem o desenvolvimento de aquífero em rochas cristalinas	15
Figura 10. Dados de vazão para a área de estudo	17
Figura 11. Mapa geológico simplificado da área de estudo	22
Figura 12. Distribuição espacial dos pontos de coleta na área de estudo segundo a unidade litológica em que se encontram	23
Figura 13. Distribuição dos erros de balanço de carga iônica	24
Figura 14. Diagramas box plot das variáveis hidroquímicas	25
Figura 15. Diagramas de Piper para unidades litológicas e SAC	30
Figura 16. Distribuição espacial dos diagramas de Stiff	31
Figura 17. Dendograma da análise de agrupamentos para as amostras	32

Figura 18. Dendograma da análise de agrupamentos para os íons	33
Figura 19. Correlação entre sódio e cálcio em águas do SAC	35
Figura 20. Correlação entre potássio e sódio em águas do SAC	36
Figura 21. Correlação entre magnésio e cálcio em águas do SAC	36
Figura 22. Matriz de correlação para as variáveis hidroquímicas	37
Figura 23. Correlação entre pH e condutividade elétrica em águas do SAC	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Regiões Hidrográficas que ocorrem na localidade do estudo e suas UGRHIs	5
Tabela 2. Principais unidades que ocorrem no Cinturão Ribeira e suas litologias	11
Tabela 3. Parâmetros comparados entre rochas sãs e alteradas	16
Tabela 4. Parâmetros físico-químicos e biológicos analisados pela CETESB	19
Tabela 5. Relações entre os cátions segundo suas concentrações	27

RESUMO

O embasamento cristalino do estado de São Paulo consiste em rochas ígneas e metamórficas de idade Pré-Cambriana que compõem o Sistema Aquífero Pré-Cambriano (SAC). As rochas de um aquífero são altamente suscetíveis a processos de alteração envolvendo diferentes tipos de reações químicas. Buscando entender se há relações entre o quimismo das águas do SAC e seus litotipos, este trabalho analisou dados hidroquímicos provenientes do Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas da CETESB, triênio 2013-2015. Foram utilizados dados de 343 amostras de água coletadas em 65 pontos na área de estudo. As amostras analisadas foram selecionadas a partir do cálculo de balanço iônico, admitindo-se erro compreendido entre $\pm 15\%$. Selecionou-se uma amostra por poço. Foi realizado tratamento estatístico univariado e multivariado e confeccionados diagramas de Piper e Stiff para classificação hidroquímica das águas e visualização da distribuição espacial das fácies hidroquímicas. Foram propostos modelos de interação água-rocha a partir das reações químicas dos minerais com a água subterrânea. O principal ânion presente nas águas é o bicarbonato (HCO_3^-) e os principais cátions o cálcio (Ca^{2+}) e o sódio (Na^+). Algumas amostras apresentam altas concentrações dos íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), podendo indicar contaminação de origem antrópica. Os valores de pH para a área variam entre 5,00 a 9,03, com média 6,97. A condutividade elétrica varia entre 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 387,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com média 181,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Concluiu-se que predominam no Sistema Aquífero Pré-Cambriano águas bicarbonatadas cálcicas e, subordinadamente, bicarbonatadas sódicas.

Palavras-chave: interação água-rocha; hidroquímica; aquífero pré-cambriano

ABSTRACT

The crystalline basement of the São Paulo State consists of Pre-Cambrian igneous and metamorphic rocks, composing the Pre-Cambrian Aquifer System (SAC). Aquifer rocks are susceptible to alteration processes involving different chemical reactions. Seeking to understand if there are relations between the water chemistry of the SAC and its lithotypes, this work analyzed hydrochemical data from the CETESB Groundwater Quality Report, triennium 2013-2015. 343 water samples were collected at 65 points in the study area. Analyzed samples were selected from the calculation of ionic balance, assuming an error between $\pm 15\%$. One sample per well was selected. Univariate and multivariate statistical treatment was performed, as Piper and Stiff diagrams for hydrochemical classification and visualization of spatial distribution of hydrochemical facies. Water-rock interaction models were proposed from chemical reactions of minerals with groundwater. Major anion in water is bicarbonate (HCO_3^-) and major cations are calcium (Ca^{2+}) and sodium (Na^+). Some samples show high concentrations of chloride (Cl^-) and sulphate (SO_4^{2-}) ions, which may indicate contamination of anthropogenic origin. PH values range from 5,00 to 9,03, averaging 6,97. Electrical conductivity values range from 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 387,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, averaging 181,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$. It was concluded that in Pre-Cambrian Aquifer System predominates calcium bicarbonate waters and, subordinately, sodium bicarbonate waters.

Keywords: water-rock interaction; hydrochemistry; pre-cambrian aquifer

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de um país, constituindo um recurso estratégico que carece de boa gestão a fim de garantir exploração e exploração racionais, bem como sua conservação sob aspecto de contaminação.

Devido à rápida expansão de centros urbanos, a demanda pela prospecção de águas subterrâneas é crescente. No Brasil, os volumes de reservas de águas subterrâneas armazenados nos sistemas aquíferos somam pouco mais de 112.000 km³ (HYPOLITO et al., 2011). No estado de São Paulo, estima-se que 70% dos municípios são abastecidos por essas águas (HIRATA et al., 2007). Visto que as águas superficiais são mais suscetíveis à degradação causada por atividades antrópicas decorrentes do uso e ocupação do solo, a captação subterrânea se mostra boa alternativa para abastecimento residencial, industrial e rural.

A disponibilidade de recurso hídrico subterrâneo para determinados usos está sujeita às características físico-químicas e microbiológicas das águas. Nesse sentido, o estudo hidroquímico do aquífero permite caracterizar os fatores que atuam na evolução hidrogeoquímica das águas subterrâneas, podendo ser intrínsecos e extrínsecos, como: intemperismo físico e químico de rochas, composição da água de recarga, clima, contaminação antropogênica (FEITOSA, 2008). A avaliação hidroquímica das águas subterrâneas auxilia, ainda, no entendimento das condições de fluxo nos sistemas aquíferos através da definição de reações naturais decorrentes da interação água-rocha (GASTMANS et al., 2013).

Em um aquífero, as rochas são altamente suscetíveis ao intemperismo químico, que envolve processos de alteração mineral por meio de reações de hidratação/hidrólise, dissolução, precipitação, entre outras, e liberam íons solúveis que são incorporados ao ambiente aquático. A água, por ser uma substância quimicamente muito ativa, tem alta capacidade de incorporar íons em sua composição. Desse modo, o soluto e suas concentrações são resultantes das litologias do aquífero e do tempo de contato água/meio físico (MAGALHÃES, 2006).

Aquíferos fraturados, devido a suas descontinuidades, anisotropia e heterogeneidade, não possuem parâmetros hidrodinâmicos constantes. Em consequência disso, prefere-se a captação de água superficial e em aquíferos

granulares. Em países em desenvolvimento, os quais muitas vezes apresentam condições precárias de saneamento básico e escassez de suprimento de água potável, a exploração de aquíferos cristalinos, ainda que de baixa produtividade, se mostra uma alternativa para abastecer estas regiões (NEVES, 2005). No Brasil, aquíferos em rochas cristalinas ocorrem nas regiões Nordeste e Sudeste. Na região Sudeste, essas águas são exploradas através de poços profundos e são fonte para abastecimento industrial, propriedades rurais e urbanas, em especial no estado de São Paulo em regiões atualmente em expansão, como as regiões metropolitanas de Campinas e Sorocaba e a Grande São Paulo (DAEE/IG/IPT/CPRM, 2005).

1.1 Justificativa

A relevância deste trabalho se pauta na importância do estudo hidroquímico como ferramenta para se mapear pontos vulneráveis ou em desequilíbrio e a qualidade dos recursos hídricos. O monitoramento e a preservação das águas subterrâneas são de vital importância para a humanidade, visto que os aquíferos estão entre as maiores reservas de água doce do planeta. O Aquífero Pré-Cambriano no estado de São Paulo, por abranger uma área de significativa atividade industrial e agropecuária, demanda constante estudo e acompanhamento para garantir que suas águas subterrâneas não sofram impacto com a atividade antropogênica.

2 OBJETIVOS

Este trabalho se baseia na hipótese de que as águas do Sistema Aquífero Cristalino (SAC) apresentam comportamentos geoquímicos distintos em resposta às condições litológicas expostas (FETTER, 2001; MAGALHÃES, 2006; EZAKI, 2011; GASTMANS et al., 2013).

Tem como objetivo principal traçar o panorama hidroquímico das águas subterrâneas do Aquífero Cristalino do estado de São Paulo.

Os objetivos específicos são:

- classificar a hidroquímica das águas do Aquífero Pré-Cambriano;
- estabelecer relações entre as propriedades químicas da água subterrânea e a litologia da área de estudo.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende as porções sul e leste do estado de São Paulo (Figura 1), onde o Sistema Aquífero Pré-Cambriano cobre uma área aflorante aproximada de 61.312 km² (DAEE/LEBAC, 2013). Estende-se por cinco regiões hidrográficas (Figura 2) e parte das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 09, 10, 11 e 14 (Tabela 1).

Os principais rios que abrangem o estado de São Paulo são: Rio Tietê, Rio Paraíba do Sul, Rio Paranapanema, Rio do Peixe, Rio Turvo, Rio Grande. De acordo com a classificação climática de Köppen, em estudo de Alvares et al. (2013), o norte do estado de São Paulo possui clima tropical com estação seca de inverno (Aw) e clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) / verão temperado (Cwb). As porções central, leste e sul do estado possuem clima subtropical úmido com verão quente (Cfa) / verão temperado (Cfb), e o litoral apresenta clima tropical úmido (Af).

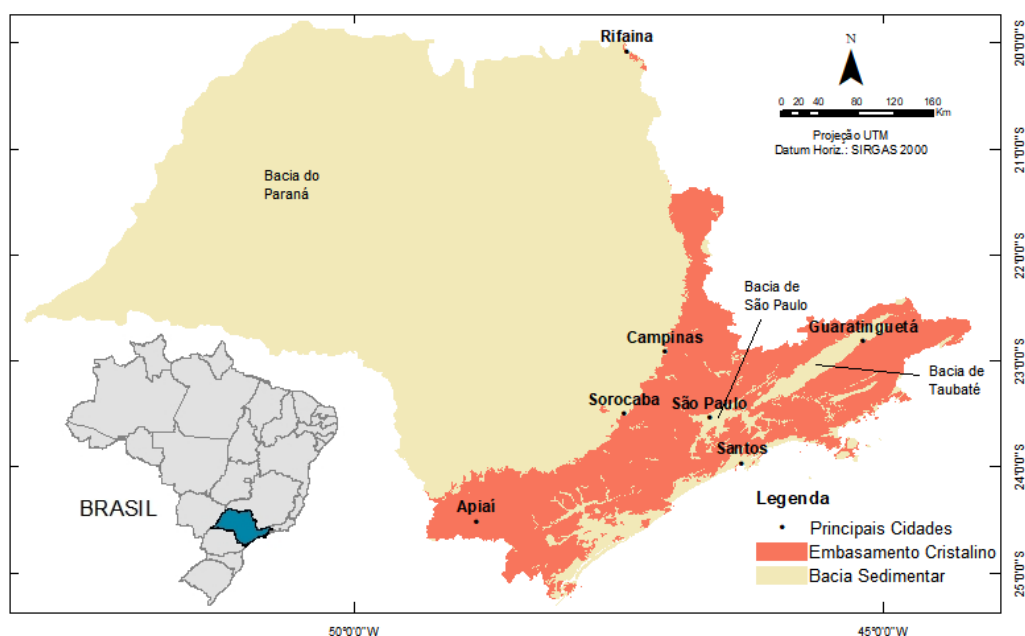


Figura 1. Mapa de localização do embasamento cristalino no estado de São Paulo.

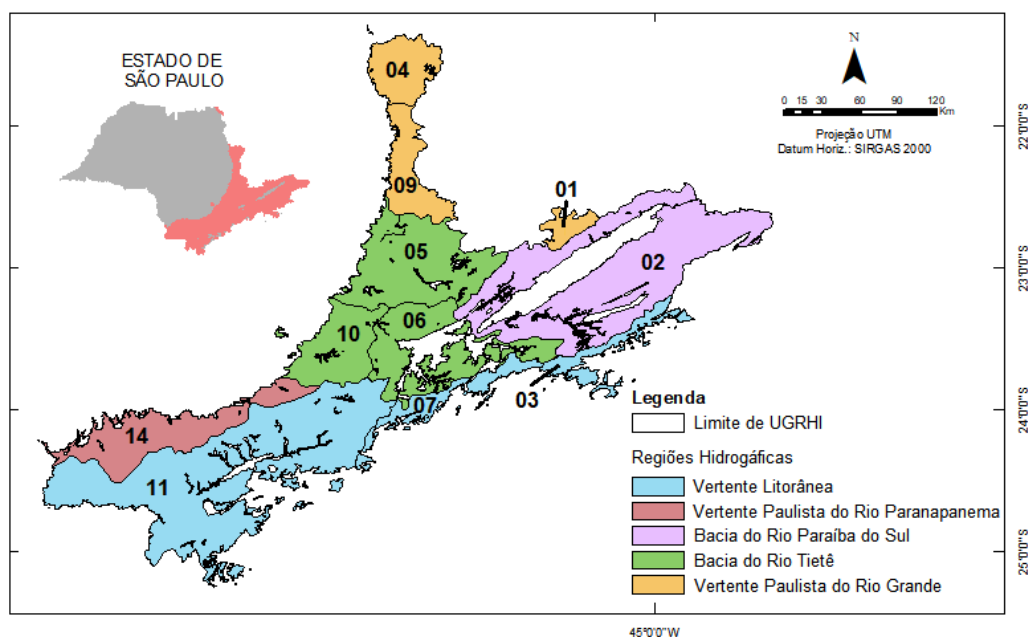


Figura 2. Regiões hidrográficas de ocorrência no embasamento cristalino e suas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs): 01 - Mantiqueira, 02 - Paraíba do Sul, 03 - Litoral Norte, 04 – Pardo, 05 - Piracicaba/Capivari/Jundiaí, 6 - Alto Tietê, 7 - Baixada Santista, 9 - Mogi-Guaçu, 10 - Tietê/Sorocaba, 11 - Ribeira de Iguapé/Litoral Sul e 14 - Alto Paranapanema.

Tabela 1. Regiões Hidrográficas que ocorrem na localidade do estudo e suas UGRHs.

Região Hidrográfica	UGRHI	Área (km ²)*	População 2016
VERTENTE LITORÃNEA		21.834	2.442.872
	03 – Litoral Norte	1.948	308.843
	07 – Baixada Santista	2.818	1.765.431
	11 – Ribeira de Iguapé/Litoral Sul	17.068	368.598
VERTENTE PAULISTA DO RIO PARANAPANEMA		51.833	1.923.812
	14 – Alto Paranapanema	22.689	744.429
BACIA DO RIO TIETÊ		72.391	30.727.413
	05 – Piracicaba/Capivari/Jundiaí	14.178	5.473.874
	06 – Alto Tietê	5.868	20.404.925
	10 – Tietê/Sorocaba	11.829	1.980.443
BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL		14.444	2.110.441
	02 – Paraíba do Sul	14.444	2.110.441
VERTENTE PAULISTA DO RIO GRANDE		56.961	5.097.921
	01 – Mantiqueira	675	66.275
	04 – Pardo	8.993	1.175.406
	09 – Mogi-Guaçu	15.004	1.526.699

*A área apresentada (km²) não corresponde necessariamente à extensão estudada. Fonte: adaptado de CETESB, 2017.

O clima da região pode ser exemplificado segundo parâmetros pluviométricos e de temperatura, com base em dados de estações nos municípios de Apiaí, São Paulo, Campinas e Guaratinguetá. Segundo Climate-Data (2018), a partir de dados coletados entre 1982 e 2012, a temperatura média em Apiaí é 17,6 °C, em São Paulo atinge 18,5 °C, no município de Campinas chega a 19,3 °C e em Guaratinguetá a temperatura média chega a 20,0 °C. Os pluviogramas médios acumulados, de acordo com o Banco de Dados Pluviométricos do estado de São Paulo (2018), mostram que o período seco compreende os meses de abril a setembro e o período úmido está entre os meses outubro e março, bem como a maior média pluviométrica é observada ao sul da área de estudo (Figura 3).

Com relação à sua biodiversidade, os biomas originais que prevalecem são Mata Atlântica nas porções norte e sul do estado e Cerrado na porção central (IBGE, 2004a). A vegetação predominante ao norte do estado é Floresta Tropical Subcaducifólia, na porção central predomina Savana típica de Cerrado e ao sul predomina Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2004b).

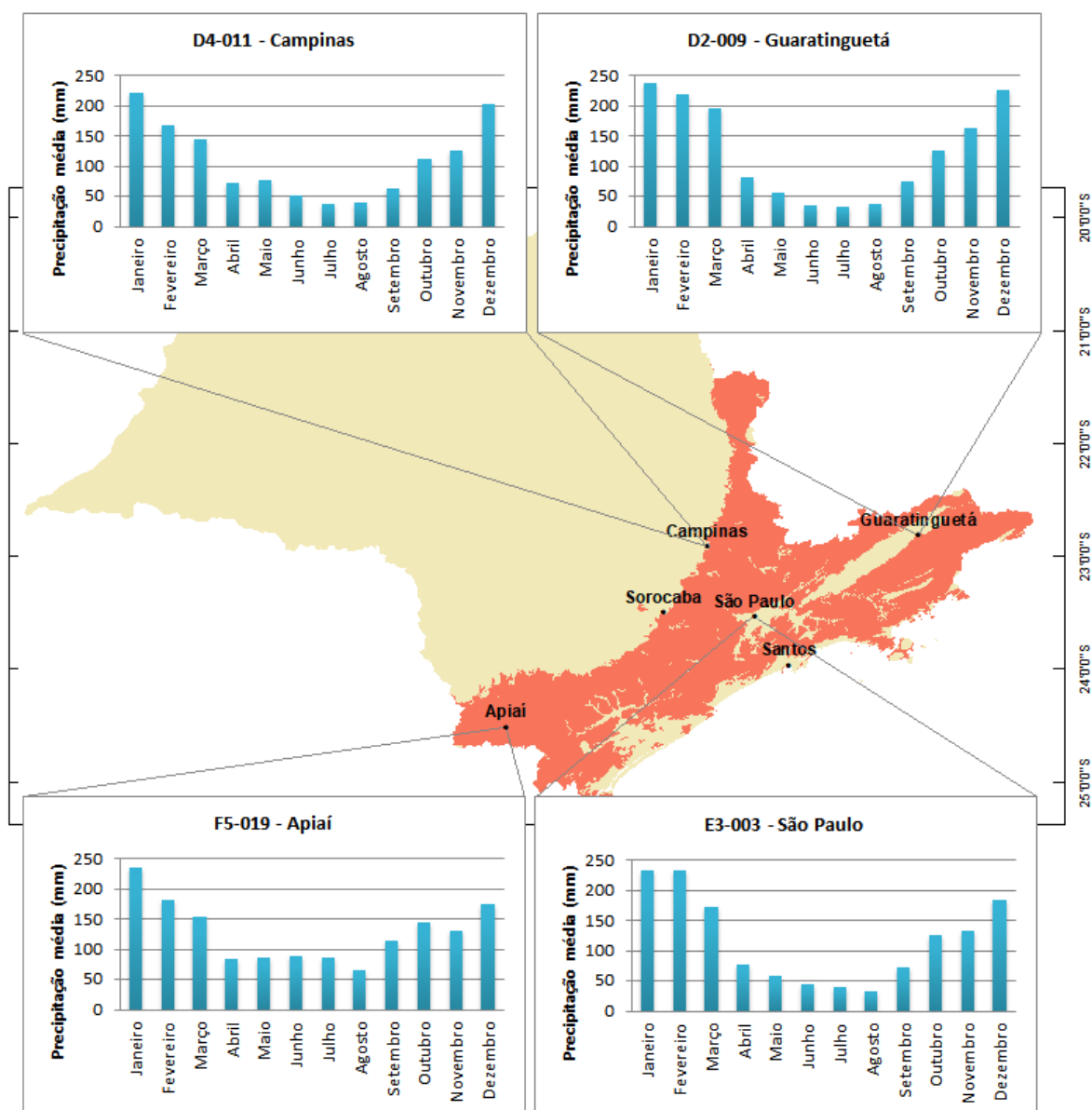


Figura 3. Pluviogramas médios acumulados de estações na área de estudo. Período de coleta de dados: Apiaí - 1960 a 2018, São Paulo – 1937 a 2017, Campinas – 1954 a 2018, Guaratinguetá – 1956 a 2015. Fonte: DAEE/Banco de Dados Pluviométricos do estado de São Paulo, 2018.

3.1 Geologia regional

O continente Sul-Americano é formado por três grandes domínios geotectônicos: os Andes, a Plataforma Patagônica e a Plataforma Sul-Americana (Figura 4a). Neste contexto, a quase totalidade do território brasileiro insere-se na Plataforma Sul-Americana, perfazendo províncias estruturais com constituição e estruturação particulares e distintas das adjacentes (Figura 4b) (HASUI, 2012).

Dentre estas províncias, a Mantiqueira caracteriza um sistema orogênico Neoproterozóico localizado nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. É parte integrante do Escudo Atlântico e compõe o embasamento da Plataforma Sul-Americana, que corresponde aos terrenos cristalinos do estado de São Paulo. De acordo com Almeida et al. (1977), a Província Mantiqueira é paralela à costa Atlântica brasileira, estruturando-se em uma faixa de direção NE-SW, com mais de 3.000 km de comprimento, 200 km de largura na parte sul e 600 km de largura na parte norte, resultando em uma área de aproximadamente 700.000 km². Sua formação é atribuída à gênese do megacontinente Gondwana, cuja aglutinação resultou na formação dos sistemas orogênicos Mantiqueira, Tocantins e Borborema.

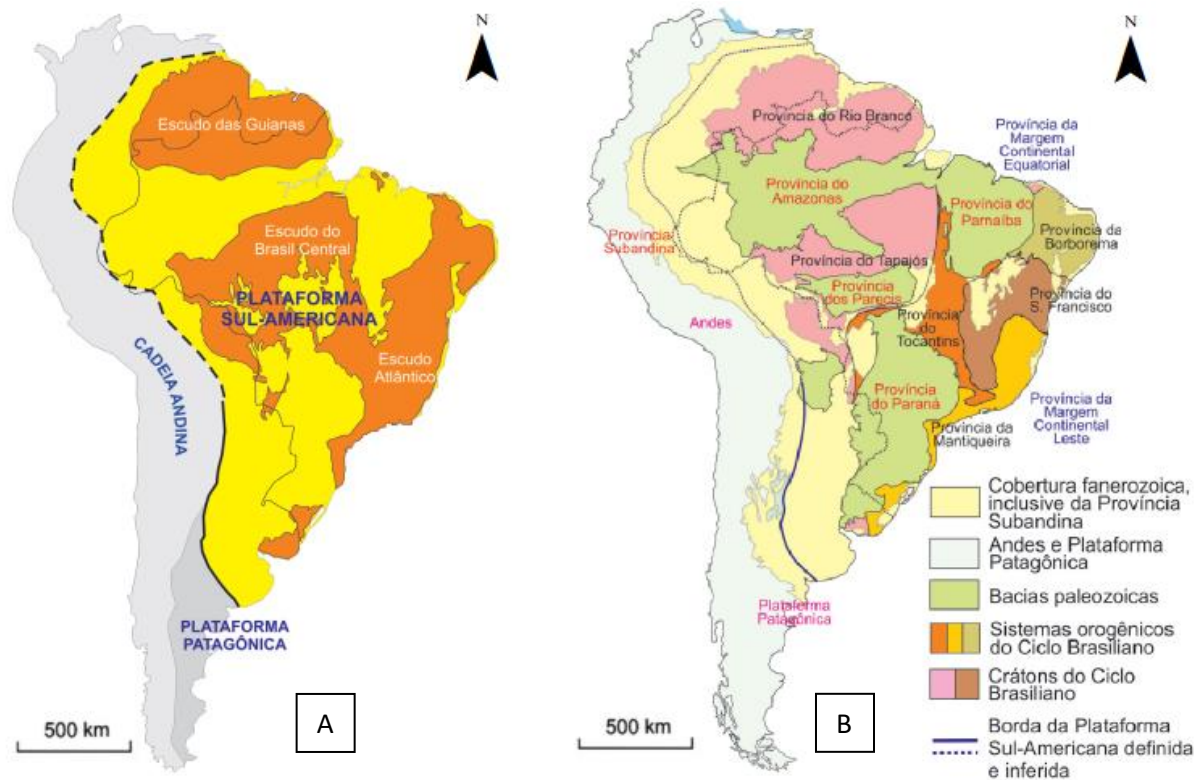


Figura 4. a) Os três grandes domínios geotectônicos do continente Sul-Americano e b) suas províncias estruturais. Fonte: modificado de Hasui, 2012.

O Sistema Mantiqueira é constituído principalmente por rochas pré-silurianas, sobretudo por três grandes conjuntos litológicos. O primeiro conjunto corresponde às unidades arqueanas, que ocorrem como núcleos dispersos, possivelmente formados durante o Ciclo Jequié no contexto do Supercontinente Kenorano. O segundo conjunto compreende as Unidades do Paleoproterozoico e Mesoproterozoico,

formadas em dois momentos distintos: i) no Ciclo Transamazônico, sob atuação de processos distintivos e de convergência associados ao Supercontinente Colúmbia ou ao Megacontinente Atlântica; e ii) em condições intraplaca no Pós-Transamazônico, associadas a formação do Supercontinente Rodínia. O terceiro conjunto é composto de rochas Neoproterozoicas a Ordovicianas, relacionadas ao Ciclo Brasileiro, desenvolvido durante três estágios - Brasileiro I, II e III - durante a fragmentação do Rodínia e formação do Megacontinente Gondwana, quando se consolidou efetivamente o sistema orogênico Mantiqueira. Outras unidades menos representativas compõem o sistema orogênico, como diques de diabásio e corpos alcalinos do Cretáceo e Paleógeno, coberturas sedimentares representadas por depósitos cretáceos e paleogênicos, e sedimentos quaternários, relacionadas com a neotectônica e a evolução geomorfológica recente (HASUI, 2012).

Segundo Almeida & Hasui (1984), o Sistema Mantiqueira foi compartimentado em três setores, referidos como Setentrional ou Araçuaí, Central ou Ribeira e Meridional ou Tijuca (Figura 5a). O Segmento Central ou Cinturão Ribeira se limita com o Cinturão Araçuaí na divisa tríplice dos estados Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. Ao norte limita-se com a porção meridional do Cinturão Brasília e ao sul faz divisa com o Cinturão Tijuca, estendendo-se até o Sudoeste do Paraná e leste de Santa Catarina. Em direção ao oeste, o cinturão é encoberto pela Bacia do Paraná e, ao leste, limita-se com a Província da Margem Continental Leste. Em termos geotectônicos, limita-se com os crátons do São Francisco, Congo e Paraná ou Parapanema (HASUI, 2012).

No Cinturão Ribeira, que corresponde majoritariamente à área de estudo deste trabalho, distinguem-se oito domínios, sendo eles: Varginha, Embu, Costeiro, São Roque, Apiaí, Curitiba, Paranaguá e Luiz Alves (Figura 5b). Segundo Hasui (2012), no Domínio Varginha predominam unidades de granitoides pré a pós-tectônicas e unidades arqueanas de alto grau. O Domínio Embu é formado pelo Complexo de mesmo nome, com rochas para e ortogranitoides, micaxistos, quartzitos e rochas cálcio-silicáticas. O Domínio Costeiro compõe o Grupo Açungui, com unidades metassedimentares. No Domínio São Roque, formado por Grupo de mesmo nome, se apresentam unidades metavulcanossedimentares com metacalcários, quartzitos e rochas cálcio-silicáticas. O Domínio Apiaí é formado por rochas alcalinas, granitoides e unidades vulcanossedimentares com andesitos,

riólitos, ignimbritos e traquitos. O Domínio Curitiba constitui unidades gnáissicas. Os Domínios Paranaguá e Luiz Alves são formados por unidades granitoides e arqueanas de alto grau (Tabela 2).

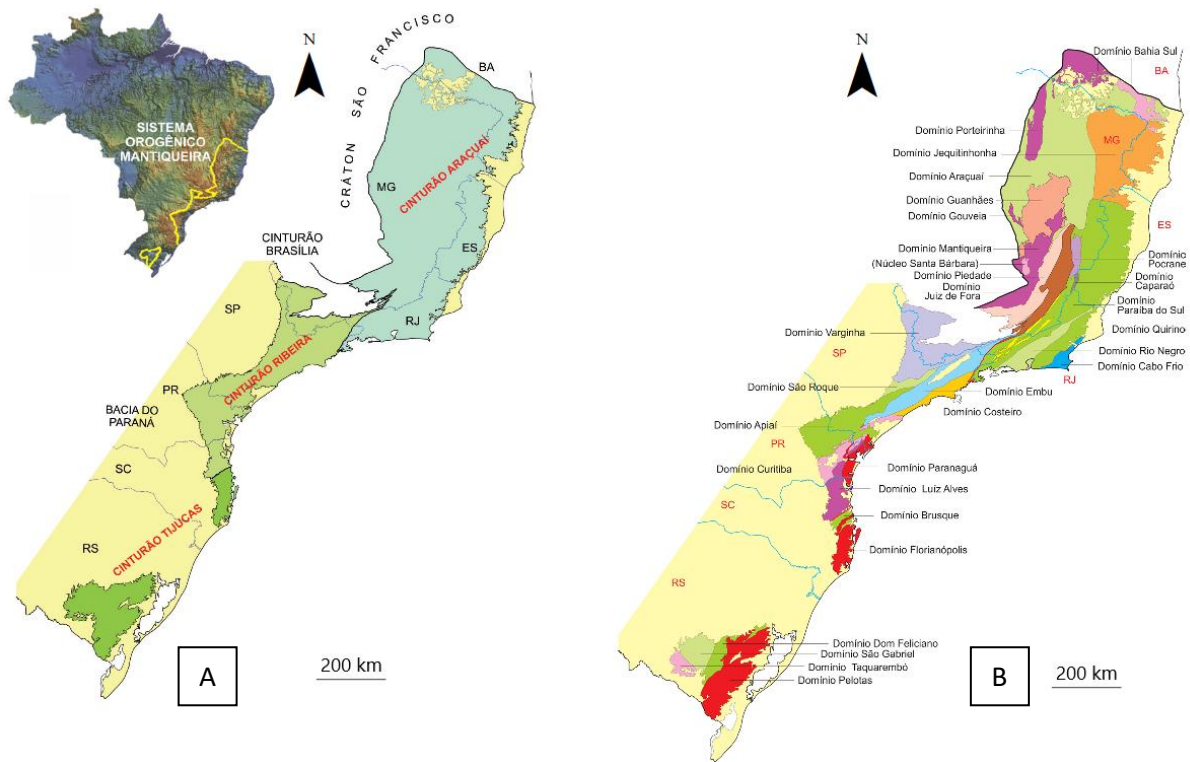


Figura 5. a) Compartimentação do Sistema Mantiqueira e b) seus domínios. Fonte: modificado de Hasui, 2012.

			Tempo geológico		Unidade	Litologia		
			Éon	Era				
Plataforma Sul-Americana	Província Mantiqueira	Cinturão Ribeira	Neoproterozoico (1000-541 Ma)	Máfico-ultramáfico	Complexo Piên	Metaultramafitos, anfíbolitos		
					Suítes Bairro do Marisco e Apiaí	Gabros		
				Alto grau	Complexo Varginha-Guaxupé	Gnaisses charnockíticos, granulitos máficos, metaultramáficos		
				Gnáissica	São Lourenço da Serra	Granitoides, gnaisses		
					Complexo costeiro	Ortognaisses, gnaisses bandados, paragnaisses, quartzitos, micaxistos		
				Metassedimentar	Formação Rio das Cobras	Micaxistos, quartzitos, xistos calcíficos, anfíbolitos, quartzitos		
					Grupo Açungui	Metassiltitos, metarenitos, filitos, quartzitos, anfíbolitos, metacalcários		
					Formação Iporanga	Metaconglomerados, metassiltitos, filitos, ardósias, anfíbolitos		
					Complexo Embu	Para e ortogneisse, micaxisto, quartzito, anfíbolito, cálcio-silicatadas		
				Metavulcanossedimentar	Grupo Itaiacoca	Metacalcário, filito, talco-xisto, metapelito, metagabros		
					Grupo São Roque	Quartzito, metassiltito, filito, metarcósio, cálcio-silicatadas, metacalcários		
				Unidades granitoides de tipos S, I, A e charnockitoides		Granitoides e charnockitoides		
				Proterozoico (2500-541 Ma)	Mesoproterozoico – pós Transamazônico (1600-1000 Ma)	Gnáissica	Complexo Meia Lua	Gnaisses sienograníticos e granodioríticos, paragnaisses, quartzitos, micaxistos, metabasitos
							Metassedimentar	Serra das Andorinhas
			Formação Betari			Quartzitos, filitos, metabasitos, micaxistos, metadolomitos		
			Formação Córrego dos Marques			Filitos, micaxistos, metacalcários, metadolomitos, filitos carbonosos		
			Metavulcanossedimentar			Subgrupo Lageado	Metassiltitos, filitos, metacalcários, metarenitos, arenitos calcíferos	
						Formação Água Clara	Cálcio-silicáticas, mármore, micaxistos, quartzitos	
						Formação Perau	Quartzitos, micaxistos, metacalcários, xistos carbonáticos	
					Grupo Votuverava	Filitos, micaxistos, quartzitos, cálcio-silicáticas, filitos carbonáticos		
			Gnáissica		Grupo Serra de Itaberaba	Metandesitos, cálcio-silicáticas, quartzitos		
					Formação Piririca	Grafita-filitos, filitos calcíferos, metamargas		
					Gnaisse Morro Alto	Gnaisses ocelares, micaxistos e quartzitos		
			Paleoproterozoico - Transamazônico (2500-1600 Ma)		Gnáissica	Gnaisse Tigre	Gnaisses ocelares, gnaisses quartzo-monzonitos a sienograníticos	
						Complexo Serra Negra	Gnaisses tonalíticos	
						Complexo Atuba	Gnaisses granodioríticos a monzograníticos, micaxistos, quartzitos, anfíbolitos	
				Complexo Rio Capivari		Gnaisses bandados graníticos e monzodioríticos com enclaves de anfíbolitos e quartzitos		
				Metassedimentar	Cachoeira	Tremolita-xistos, quartzo-xistos, micaxistos, quartzitos		
			Metavulcanossedimentar	Complexo Apiaí-Mirim	Mármore, quartzitos, micaxistos, cálcio-silicatadas, anfíbolitos, ortognaisses			
			Arqueano (4000- 2500 Ma)		Gnáissica		Ortognaisses, anfíbolitos, micaxistos	
					Máfico-ultramáfica		Metapiroxenitos, metagabros	
					Alto grau	Complexo Serra Negra	Charnockitos, enderbitos, dioritos, tonalitos	
Complexo Santa Catarina	Gnaisses granulíticos dioríticos, monzodioríticos, monzoníticos, sieníticos							

Tabela 2. Principais unidades que ocorrem no Cinturão Ribeira e suas litologias. Fonte: Hasui, 2012; com idades de International Chronostratigraphy Chart v. 2018/08

4 HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) é um aquífero fraturado constituído de rochas ígneas e metamórficas que apresentam permeabilidade secundária, ou seja, por serem compactas, sua permeabilidade primária é muito baixa e a água percola através de fraturas (juntas e falhas), que se formam após a rocha ter sido resfriada e consolidada.

O estado de São Paulo compreende quatro tipos de aquíferos fraturados: Pré-Cambriano (p€), aflorante na porção leste do estado, composto por rochas metamórficas de grau variado e rochas graníticas; Pré-Cambriano Carbonático (p€c), aflorante no sul do estado e formado por mármore e metacalcários; Aquífero Serra Geral (Ksg), constituído pelos basaltos da Formação Serra Geral, de idade eocretácica; Aquífero Diabásio (Ksgd), correspondente aos corpos de diabásio na forma de diques e soleiras da Formação Serra Geral (FERNANDES et al., 2007) (Figura 6).

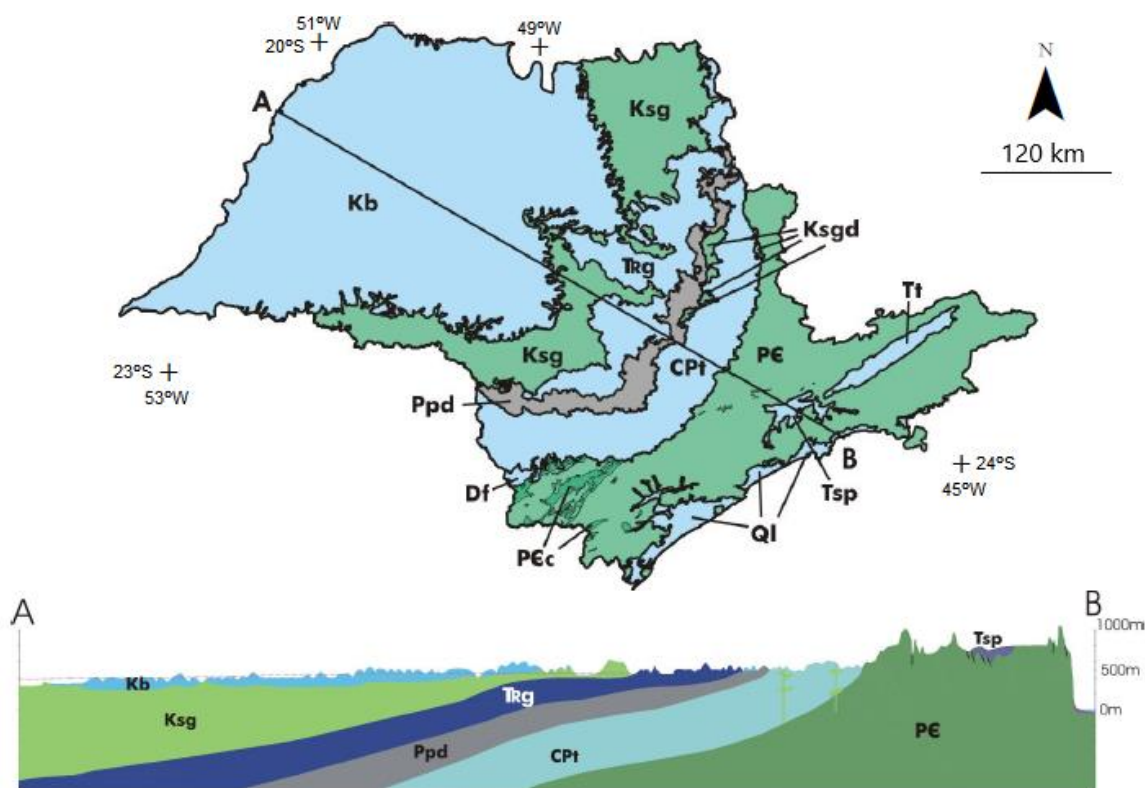


Figura 6. Mapa e seção hidrogeológica dos aquíferos que ocorrem no estado de São Paulo: pré-Cambriano (P€), pré-Cambriano cárstico (P€c), Furnas (Df), Tubarão (Cpt), Aquicluda Passa Dois (Ppd), Guarani (TRg), Serra Geral (Ksg), Serra Geral Diabásio (Ksgd), Bauru (Kb), São Paulo (Tsp), Taubaté (Tt), Litorâneo (Ql). Fonte: modificado de Fernandes et al., 2007.

4.1 Modelo hidrogeológico conceitual do SAC

Um aquífero cristalino pode ser dividido em dois compartimentos hidrogeológicos distintos, sendo eles: aquífero do manto inconsolidado ou manto de intemperismo e aquífero fraturado (Figura 7).

O manto inconsolidado corresponde a um perfil de alteração desenvolvido a partir do intemperismo em rochas cristalinas, sob clima úmido, que pode chegar a dezenas de metros (Figura 8). Este perfil constitui o regolito, formado pelo solo residual, horizontes “A” e “B”, onde não é possível reconhecer a rocha original, e o saprólito, horizonte “C”, no qual se reconhece parcialmente composição mineralógica e estruturas originais. O aquífero do manto inconsolidado se comporta como meio de porosidade granular, portanto, com porosidade primária. Lachassagne et al. (2001, apud NEVES, 2005) descreve um modelo conceitual para o perfil de alteração, sendo, da base para o topo:

- a) rocha sã afetada por fraturamento tectônico;
- b) zona intermediária, alterada e fraturada, caracterizada por juntas sub-horizontais cuja gênese é atribuída à descompressão e aos processos de alteração. O número de juntas diminui com o aumento da profundidade;
- c) camada superficial alterada, com espessuras que variam de zero até várias dezenas de metros. Sua composição argilo-arenosa confere permeabilidade relativamente baixa, mas significativa capacidade de retenção de água devido à textura e estrutura do solo. Quando saturadas, estas camadas armazenam a maior parte da água subterrânea neste contexto hidrogeológico.

Em climas secos, onde predominam o intemperismo físico e biológico, como é o caso do Nordeste brasileiro, a baixa pluviosidade não favorece o intemperismo na rocha cristalina e o manto de intemperismo não chega a se desenvolver de forma expressiva para se tornar um subsistema aquífero (NEVES, 2005).

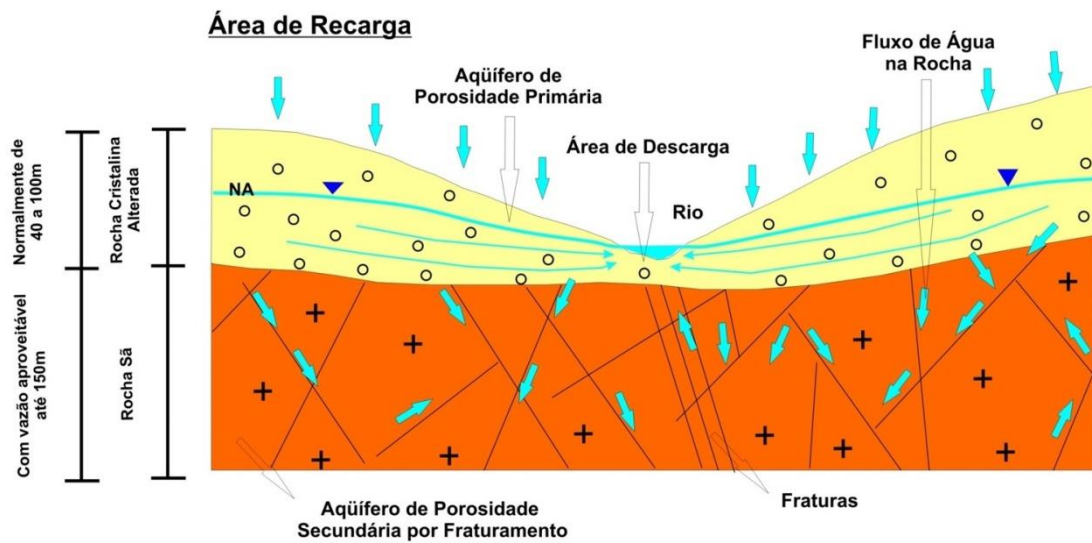


Figura 7. Modelo conceitual de circulação de água em aquífero cristalino, com o manto de intemperismo próximo a superfície e, abaixo dele, aquífero fraturado. Fonte: modificado de Hirata & Ferreira, 2001.

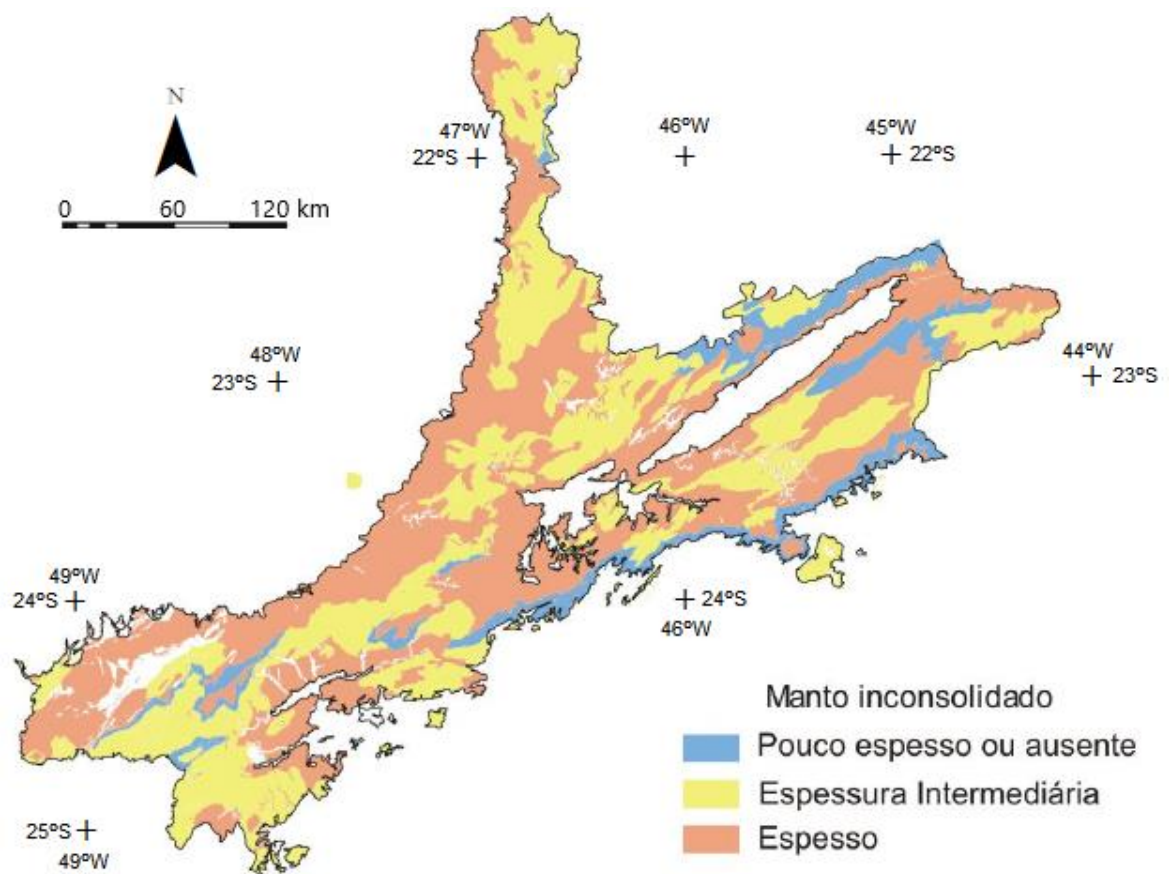


Figura 8. Espessura do manto inconsolidado sobre rochas cristalinas na área de estudo. Referências: pouco espesso ou ausente, < 5 m; espessura intermediária, entre 5 e 30 m; espesso, > 30 m. Fonte: extraído de Fernandes et al, 2007.

O aquífero fraturado, por sua vez, tem seu desenvolvimento relacionado a descontinuidades no maciço rochoso, uma vez que a rocha cristalina não fraturada tem menos de 1% de porosidade e permeabilidade desprezível (DAVIS & TURK, 1964 apud NEVES, 2005). A percolação e acumulação de água neste tipo de aquífero são controladas pela ocorrência de estruturas rúpteis na rocha, como fraturas (juntas e falhas), contatos geológicos entre litologias distintas e planos de foliações e lineações, estes presentes principalmente em rochas metamórficas (FEITOSA, 2008) (Figura 9).

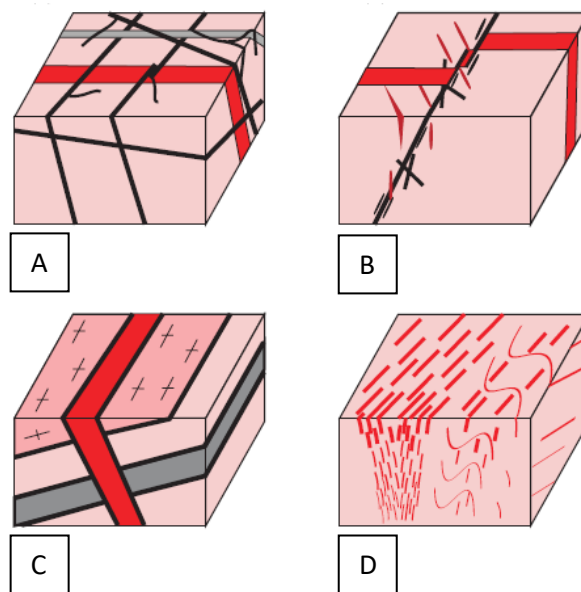


Figura 9. Estruturas que permitem o desenvolvimento de aquífero em rochas cristalinas: a) juntas; b) falhas; c) contato geológico entre diferentes litologias; d) superfícies de foliação intemperizadas.

Fonte: extraído de Feitosa, 2008.

4.2 Propriedades hidráulicas e produtividade em rochas cristalinas

O potencial hidrogeológico de aquíferos cristalinos está diretamente relacionado às estruturas presentes nas rochas. Devido à grande descontinuidade e heterogeneidade intrínseca a estes meios, os valores de produtividade são muito variáveis e não podem ser extrapolados para grandes áreas.

As principais propriedades hidráulicas de um aquífero são: capacidade específica (Q/s), condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e porosidade efetiva. A capacidade específica, segundo DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), corresponde

à vazão retirada por metro rebaixado do nível d'água ($m^3/h/m$). Condutividade hidráulica é a facilidade com que uma litologia permite a percolação de fluido sob um gradiente potencial (m/s). Transmissividade é a capacidade do aquífero de transmitir água e pode ser determinada através do produto do coeficiente de permeabilidade pela espessura de uma camada do material (m^2/dia). A porosidade efetiva indica a quantidade de água que o aquífero é capaz de armazenar (%).

As fraturas, uma vez formadas, apresentam permeabilidade (fraturas interconectadas) quando as diferentes famílias destas estruturas se interceptam. Assim, pode-se dizer que o fluxo de água neste meio é determinado pela abertura da fratura. Neves (2005) mostra que, em um meio intensamente fraturado, a Lei de Darcy torna-se válida e a condutividade hidráulica é proporcional ao cubo da abertura da fratura (Lei Cúbica), podendo uma simples fratura de 1,0 mm de abertura transmitir mais água do que 900 fraturas paralelas planares de 0,1 mm de abertura. Este tipo de estrutura é de grande importância para se obter bons índices de produção em aquífero fraturado.

Engelbrecht (2017) compilou dados de condutividade hidráulica e porosidade em diferentes litologias de rochas cristalinas sãs e fraturadas/alteradas (Tabela 3). Pode-se observar, então, que os processos de alteração e fraturamento da rocha aumentam consideravelmente sua condutividade e porosidade.

Tabela 3. Parâmetros comparados entre rochas sãs e alteradas.

Litologia	Condutividade hidráulica (m/s)	Referência*
Granito	$1,2 \times 10^{-13}$ a 7×10^{-10}	4
Xisto	$1,8 \times 10^{-11}$ a $1,9 \times 10^{-7}$	4
Rochas cristalinas (indiscriminada)	10^{-10} a 10^{-14}	1
Rochas cristalinas fraturadas (indiscriminada)	3×10^{-14} a 2×10^{-10}	2
Xisto alterado/fraturado	10^{-6} a 10^{-10}	1
Gabro alterado	8×10^{-9} a 3×10^{-4}	2
Granito alterado	$3,8 \times 10^{-6}$ a $1,2 \times 10^{-5}$	4
	$5,5 \times 10^{-7}$ a $3,8 \times 10^{-6}$	2
	$3,3 \times 10^{-6}$ a $5,2 \times 10^{-5}$	2
Litologia	Porosidade (%)	Referência*
Diorito/Gabro	0,2 a 3	4
Granito	0,002 a 6	4
Gnaisse	0,7 a 1,6	4
Xisto	0,6 a 3	4
Xisto alterado	38 a 46	4
Gabro alterado	42 a 45	3
Granito alterado	34 a 57	3

Fonte: 1 – SANDERS, 1998; 2 – DOMENICO; SCHWARTZ, 1990; 3 – MORRIS; JOHNSON, 1967; 4 – WOLF, 1982. Extraído de Engelbrecht, 2017.

No que diz respeito à produtividade, o Sistema Aquífero Cristalino apresenta características distintas segundo o tipo litológico. Hirata & Ferreira (2001), apontam que a capacidade específica média (Q/s) das rochas granitoides do aquífero é 0,20 m³/h/m, sendo que nas rochas metamórficas esse valor é 1,35 m³/h/m. DAEE/IG/IPT/CPRM (2005) descreve mediana de 0,06 m³/h/m para a capacidade específica dos granitos e 0,09 m³/h/m para os gnaisses. As rochas carbonáticas, aflorantes no sul da área de estudo, apresentam intervalos de vazão mais elevados comparando-se com as demais litologias cristalinas, devido, principalmente, às suas cavidades de dissolução (Figura 10). DAEE/LEBAC (2013) aponta que 83% das vazões específicas do Aquífero Cristalino alcançam até 0,5 m³/h/m, sendo que 43% situam-se entre 0,2 m³/h/m e 0,5 m³/h/m. A transmissividade do SAC varia entre 0,4 e 14 m²/dia e sua porosidade eficaz é da ordem de 3% (HIRATA & FERREIRA, 2001).

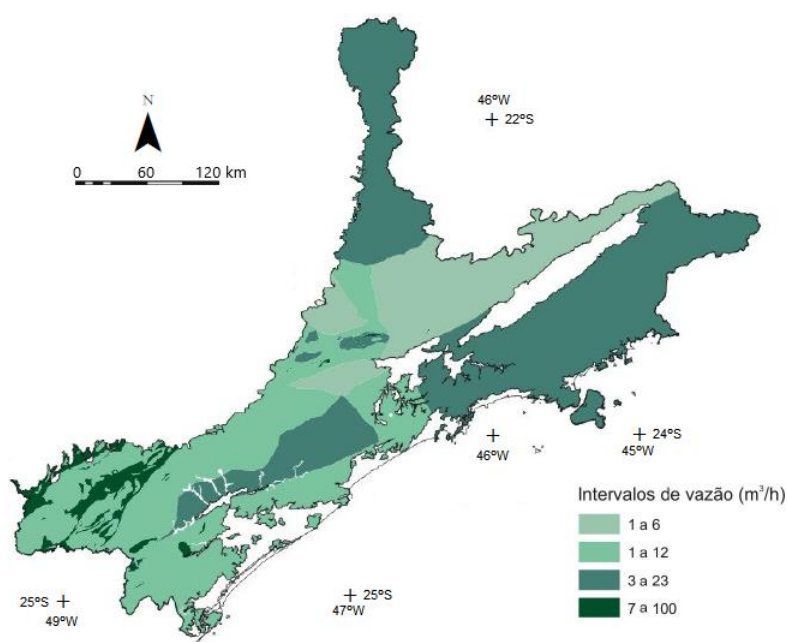


Figura 10. Dados de vazão para a área de estudo. Fonte: modificado de Fernandes et al. 2007.

A recarga nos sistemas aquíferos cristalinos ocorre, principalmente, pela infiltração de água de precipitação no solo, atingindo a rocha fraturada. Dessa forma, pode-se dizer que a recarga destes aquíferos está relacionada com o fator climático da região e seu regime de precipitação. Em climas úmidos, o manto de intemperismo, uma vez que atua como aquífero de porosidade granular, pode condicionar os processos de recarga do aquífero fraturado (REBOUÇAS, 1988).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Levantamento de dados

5.1.1 Dados hidroquímicos

O estudo hidroquímico do Aquífero Pré-Cambriano do estado de São Paulo foi realizado a partir de dados do Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas da CETESB, triênio 2013-2015 (CETESB, 2016). Esta publicação, realizada pela Companhia Ambiental do estado de São Paulo a cada três anos, tem como objetivo caracterizar as águas subterrâneas do estado e subsidiar ações de prevenção e controle de poluição e gestão da qualidade do recurso hídrico subterrâneo.

Na área de estudo, o monitoramento sistemático da qualidade das águas subterrâneas realizado pela CETESB teve início no ano de 1997, determinando 19 parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, considerados como principais indicadores da qualidade das águas subterrâneas.

Durante o período de estudo, foram avaliadas as águas subterrâneas em 65 pontos diferentes, entre poços tubulares e nascentes. Foram consultados os cadastros de Poços do DAEE, SABESP, Prefeituras Municipais e os cadastros de empreendimentos licenciados pela CETESB. Para os poços tubulares, foram utilizados os seguintes critérios: possuir licença de outorga do DAEE; construção de acordo com as normas ABNT NBR 12.244/92 e NBR 12.212/92; o material de construção do poço ser PVC ou aço inoxidável; os filtros estarem localizados em um único aquífero; facilidade de acesso; medidas de proteção contra contaminação; e possuir ramal junto ao poço para coleta da amostra, antes de qualquer tratamento. Preferencialmente, foram escolhidos os poços utilizados para abastecimento público de água, os que possuem o nível d'água mais próximo da superfície e aqueles instalados a montante de fontes potencialmente poluidoras.

A rede de monitoramento tem como critério a espacialização nas diferentes UGRHs, de modo a se atingir minimamente a densidade de 1 poço a cada 1000 km², considerando também as áreas de afloramento dos aquíferos explorados.

Os critérios para seleção das nascentes foram: vazão contínua durante o ano todo, com preferência para nascentes com vazões maiores e protegidas de

enxurradas; instalação de obras de captação, para facilitar a coleta de amostras; e acessibilidade.

As determinações analíticas foram realizadas por diferentes laboratórios da CETESB. Os parâmetros analisados para caracterização química e avaliação da qualidade da água subterrânea bruta no período de 2013 a 2015 estão listados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros físico-químicos e biológicos analisados pela CETESB.

Parâmetros Físicos	temperatura da água e do ar, sólidos dissolvidos totais e sólidos totais
Parâmetros Químicos	pH, alcalinidade bicarbonato, alcalinidade carbonato, alcalinidade hidróxido, condutividade elétrica, dureza total, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio amoniacal total, nitrogênio total, carbono orgânico dissolvido, cloreto, fluoreto, sulfato e as concentrações totais de alumínio, antimônio, arsênio, bário, berílio, boro, cádmio, cálcio, chumbo, cobalto, cobre, crômio, crômio hexavalente, estanho, estrôncio, ferro, lítio, magnésio, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, potássio, prata, selênio, sódio, titânio, urânio, vanádio e zinco
Parâmetros Microbiológicos	bactérias heterotróficas, <i>Escherichia coli</i> , coliformes totais bacteriófagos F-específicos e atividade estrogênica

Fonte: CETESB, 2016.

5.1.2 Dados geológicos

Os dados geológicos foram obtidos juntos à base de dados temática do Sistema de Dados, Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil (GeoSGB/CPRM), extraídos da planilha de atributos do arquivo em formato shapefile do Mapa Geológico do estado de São Paulo, escala 1:750.000.

Considerando-se o objetivo deste trabalho, optou-se por dividir o embasamento cristalino do estado de São Paulo em oito unidades distintas a partir de litotipos, sendo elas: gnaisses, granitoides, suítes alcalinas, mica xistos, mármore, migmatitos, filitos e metarenitos (Figura 11).

As amostras utilizadas neste estudo foram separadas em grupos segundo a unidade litológica aflorante em que o ponto de coleta se encontra. Criou-se o grupo indistinto para alocar as amostras coletadas em unidades sedimentares que não puderam ser relacionadas a unidades cristalinas (Figura 12).

5.2 Tratamento dos dados

Para este estudo hidroquímico, foram analisados os íons bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), fluoreto (F^-), cálcio (Ca^{2+}), sódio (Na^+), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), e parâmetros como condutividade elétrica e pH (Anexo A).

A avaliação da qualidade dos resultados foi feita por meio do cálculo do balanço iônico (Equação I) (LOGAN, 1965). Em uma análise hidroquímica, a concentração total dos cátions deve ser aproximadamente igual à concentração total dos ânions, sendo que o desvio percentual dessa igualdade é dado pelo coeficiente de erro da análise. Para este estudo foi convencionado um erro compreendido entre $\pm 15\%$.

$$e\% = \left[\frac{\Sigma c - \Sigma a}{\Sigma c + \Sigma a} \right] \cdot 100 \quad \text{Equação I}$$

Onde:

- e% é o coeficiente de erro da análise;
- Σc é a concentração total dos cátions, em miliequivalente por litro (meq/L);
- Σa é a concentração total dos ânions (meq/L).

O tratamento estatístico consistiu em métodos estatísticos e gráficos, univariados e multivariados.

A avaliação preliminar, univariada, foi feita com as concentrações dos cátions e ânions expressas em miliequivalente por litro (meq/L) utilizando-se o programa Microsoft Excel para determinar valores máximo e mínimo, média e desvio padrão. Os diagramas box plot foram elaborados com o software BioEstat 5.0.

A análise multivariada consistiu em análises de agrupamentos (cluster analysis) e dendogramas elaborados utilizando-se o software Statistica versão 10.0. Esta é uma técnica estatística cuja finalidade é agregar objetos com base nas características que eles possuem, resultando em objetos com máxima homogeneidade dentro de grupos, ao mesmo tempo em que os grupos apresentam máxima heterogeneidade entre si. Neste trabalho utilizou-se o método Ward para a análise, segundo Sharma (1996, apud REGHUNATH, 2002), produz maiores

proporções das classificações do que os outros métodos. As correlações entre as variáveis foram feitas com o programa Microsoft Excel.

Para classificar as águas do aquífero utilizou-se o diagrama de Piper (PIPER, 1944). Para tal, empregou-se o software Diagrammes versão 6.51, do Laboratório de Hidrogeologia da Universidade d'Avignon. O diagrama de Piper é um diagrama trilinear que possibilita a distinção entre grupos hidroquímicos quanto aos íons dominantes, expressos em miliequivalente por litro (meq/L). É dividido em três grupos de íons representados por dois triângulos, sendo que cada vértice indica 100% da concentração de um dos três constituintes. O campo em formato de diamante entre os dois triângulos é usado para representar a composição da água em relação aos cátions e ânions (FETTER, 2001).

Os diagramas de Stiff (STIFF, 1951), que analisam hidroquimicamente amostras individuais, foram elaborados a partir do software RockWorks 15. O diagrama de Stiff é representado por um polígono criado a partir de eixos horizontais paralelos tendo como centro um eixo vertical. Os cátions são plotados em miliequivalentes por litro (meq/L) à esquerda do eixo central e os ânions são plotados à direita, na mesma unidade de medida (FETTER, 2001). Diagramas de Stiff são úteis para se distinguir de forma rápida fácies hidroquímicas.

Os mapas temáticos foram confeccionados com o software ArcGIS versão 10.3 a partir de dados vetorizados do Sistema de Dados, Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil (GeoSGB/CPRM) e do Projeto HIDROGEO BASE do Laboratório de Hidrologia e Hidrogeologia Operacional da Universidade Estadual Paulista (UNESP), câmpus de Ourinhos.

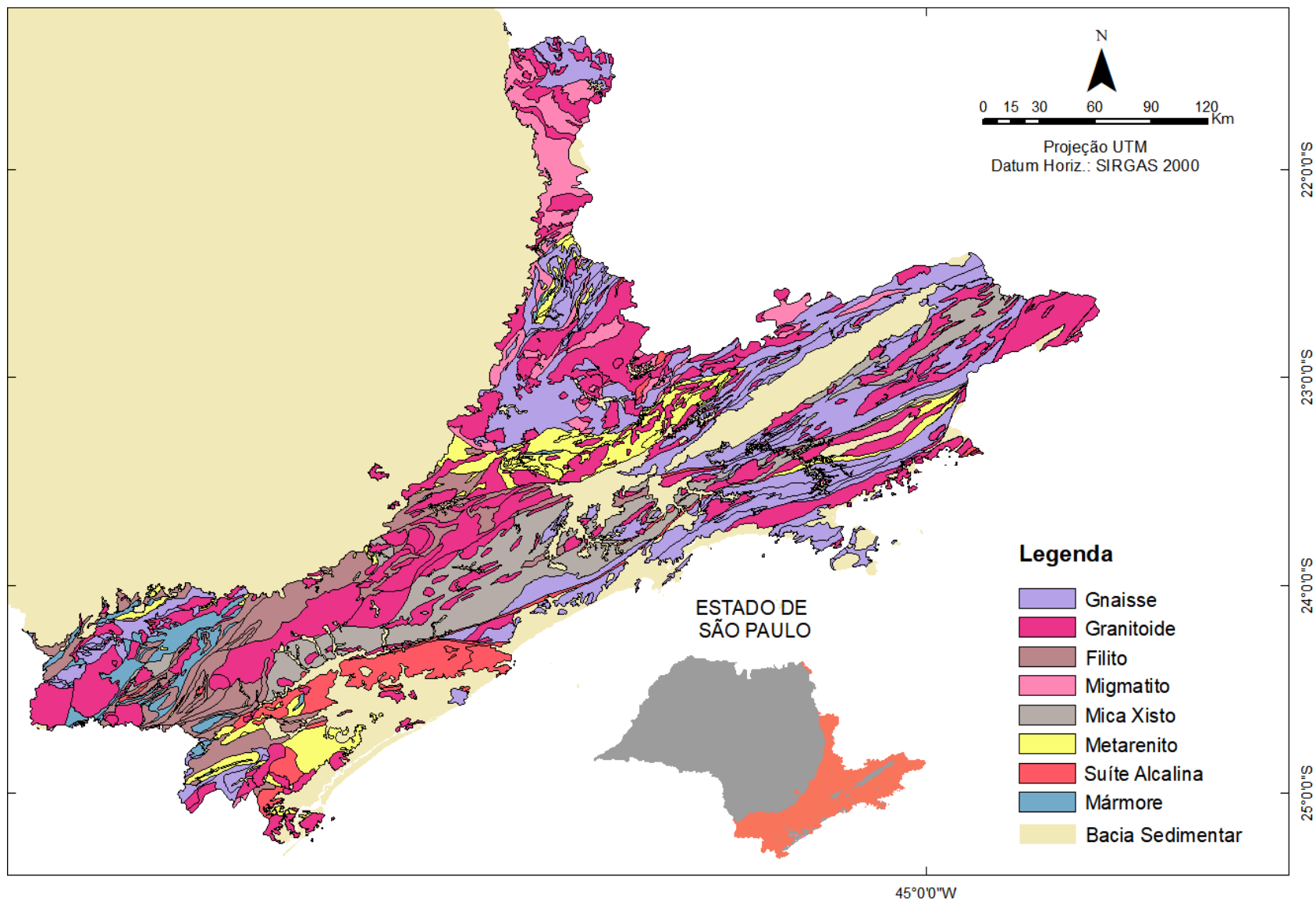


Figura 11. Mapa geológico simplificado da área de estudo.

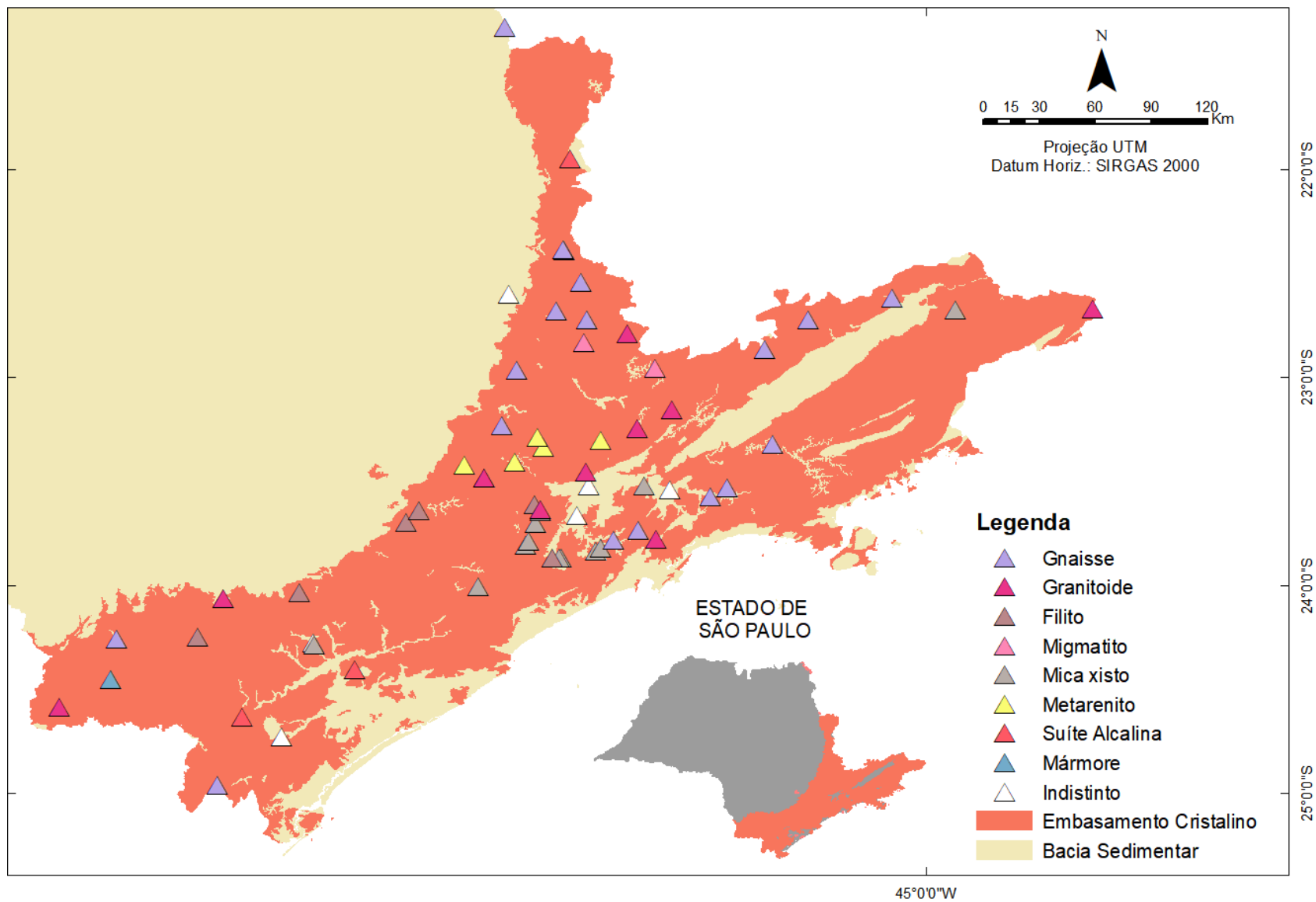


Figura 12. Distribuição espacial dos pontos de coleta na área de estudo segundo a unidade litológica em que se encontram.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise do erro de balanço iônico

Os resultados analíticos totalizaram dados de 343 amostras coletadas em 65 pontos, entre poços tubulares e nascentes. As amostras foram coletadas em duas campanhas de trabalho de campo. Em cada ponto pode ter sido coletada mais de uma amostra. Dessa forma, a partir do cálculo de balanço iônico, selecionou-se uma amostra por poço, sendo elas as que apresentaram os menores valores de erro de balanço. Do total, apenas 1 ponto não possuía amostras dentro do erro aceitável. Devido à abrangência da área de estudo, optou-se por utilizar este ponto, o qual apresentou amostra com valor mínimo de erro de 17,6% (Figura 13).

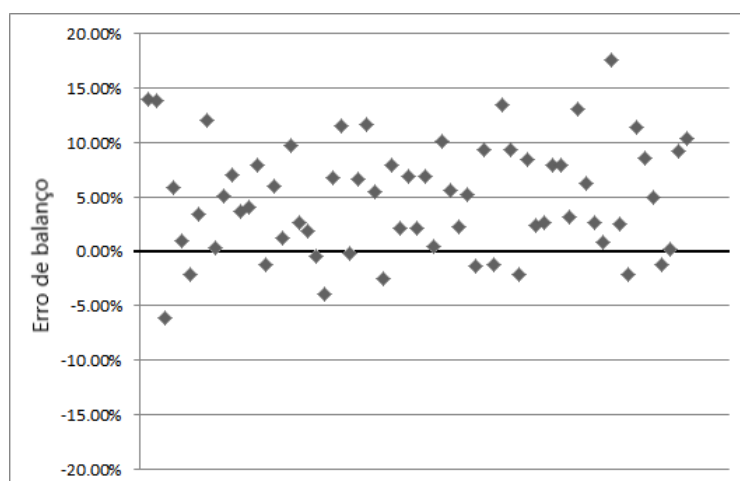


Figura 13. Distribuição dos erros de balanço de carga iônica.

Os erros observados apresentam tendência positiva, o que mostra que a concentração de ânions das amostras é superior à concentração de cátions.

6.2 Composição química

Com base nos valores de concentrações das variáveis, pôde-se fazer correlações gráficas através de diagramas box plot (Figura 14) que permitiram visualizar padrão de ocorrência por unidade litológica. O grupo indistinto não consta nestes diagramas por apresentar valores de concentração hidroquímica muito discrepantes das outras unidades, o que dificultaria a visualização dos gráficos.

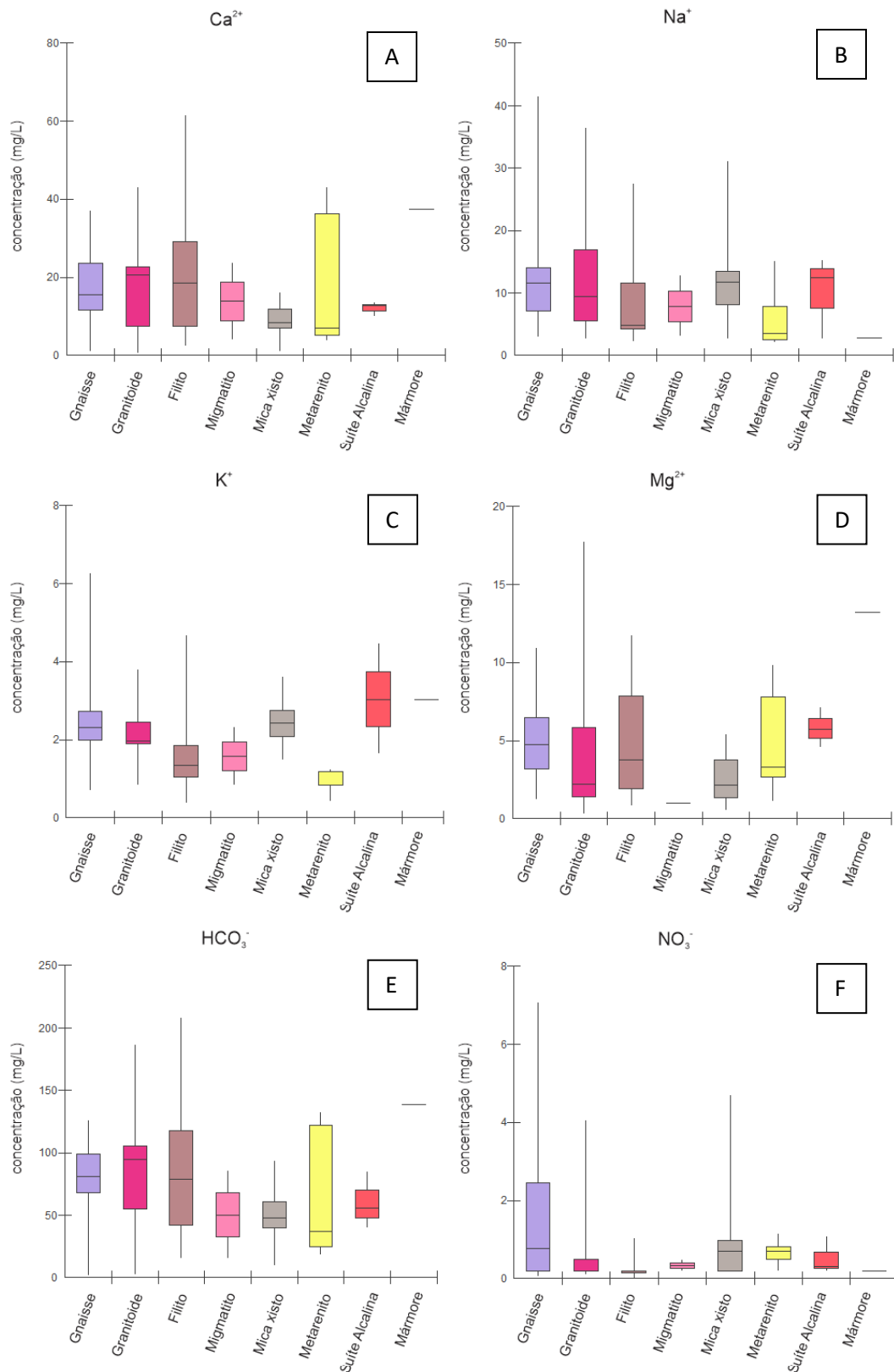


Figura 14. A-F: Diagramas box plot das variáveis hidroquímicas (traços indicam que não há variação na concentração).

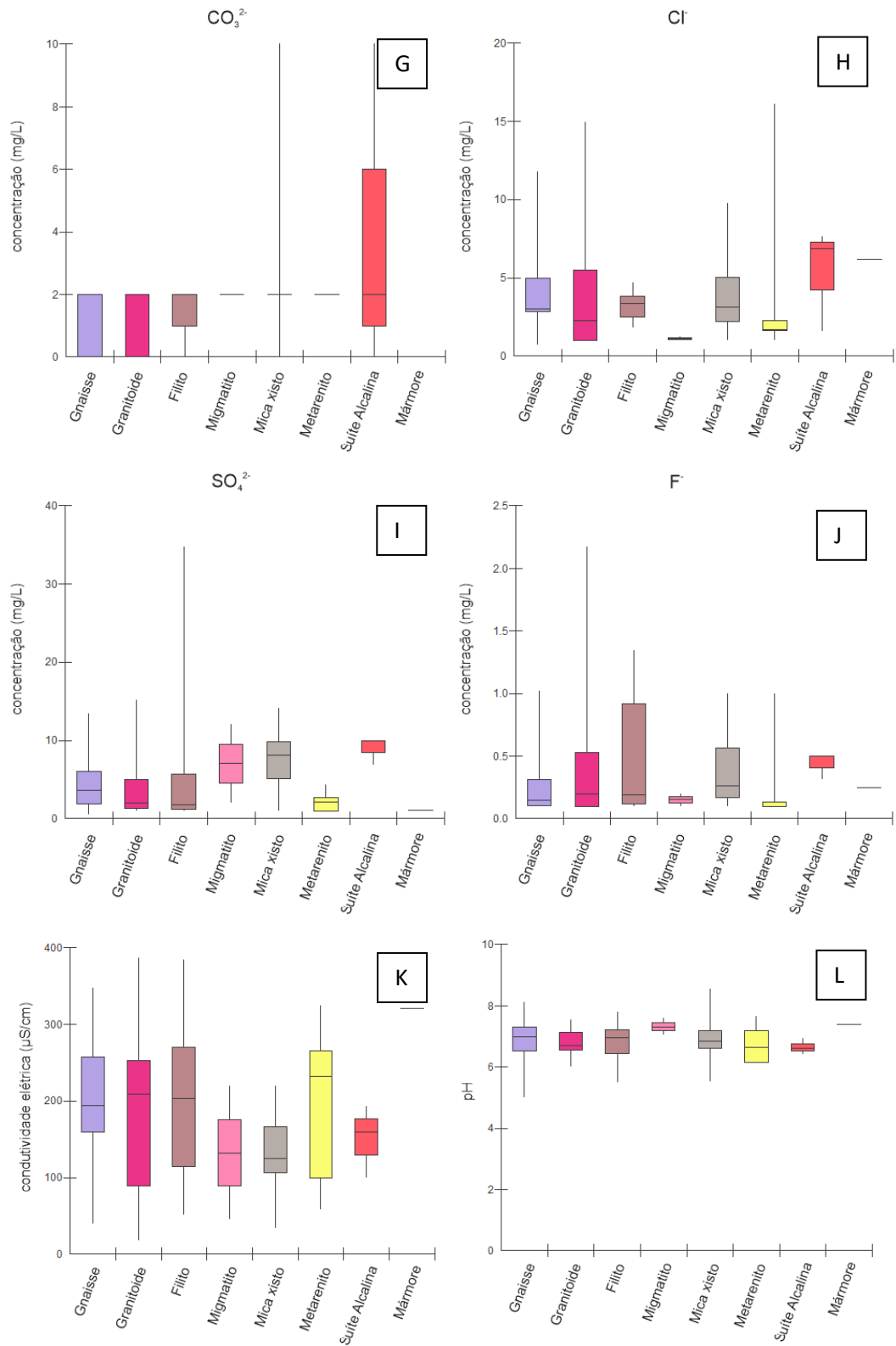


Figura 14. G-L: Diagramas box plot das variáveis hidroquímicas (traços indicam que não há variação na concentração).

O principal ânion que ocorre no aquífero é o bicarbonato, atingindo valores de até 208 mg/L, o que leva às concentrações superiores de ânions sobre cátions. Estes altos valores de concentração se devem, principalmente, à dissolução incongruente de minerais como feldspatos e micas em presença de CO₂, que será discutido adiante.

Analisando-se a concentração dos cátions, podem-se estabelecer as relações individuais apresentadas na Tabela 5. Nota-se que os cátions principais são o cálcio e o sódio e, subordinadamente, magnésio e potássio.

Tabela 5. Relações entre os cátions segundo suas concentrações.

Relação entre os cátions	Número de amostras
Ca ²⁺ >Na ⁺ >Mg ²⁺ >K ⁺	17
Ca ²⁺ >Mg ²⁺ >Na ⁺ >K ⁺	7
Ca ²⁺ >Na ⁺ >K ⁺ >Mg ²⁺	9
Ca ²⁺ >Mg ²⁺ >K ⁺ >Na ⁺	3
Na ⁺ >Ca ²⁺ >Mg ²⁺ >K ⁺	10
Na ⁺ >Ca ²⁺ >K ⁺ >Mg ²⁺	14
Na ⁺ >K ⁺ >Ca ²⁺ >Mg ²⁺	2
Na ⁺ >Mg ²⁺ >Ca ²⁺ >K ⁺	1
Mg ²⁺ >Ca ²⁺ >Na ⁺ >K ⁺	1
Mg ²⁺ >Na ⁺ >K ⁺ >Ca ²⁺	1

O grupo indistinto é formado por 6 amostras coletadas em poços de unidades sedimentares, em sua maioria depósitos aluvionares. O pH médio destas águas tende a alcalino, com média 7,83 (mín.: 6,34 – máx.: 9,03). Sua condutividade elétrica média é 203,43 µS/cm. Não há um padrão bem definido na concentração de cátions. Algumas amostras apresentaram altos teores de sódio, uma amostra apresentou alto teor de magnésio e duas amostras apresentaram concentrações médias de Na-Ca-Mg.

Os valores médios de pH das unidades não apresentam discrepância entre si, estando próximos de 7. Estes valores são condizentes com o valor de pH médio para as águas do Aquífero Cristalino apresentado por Ezaki et. al (2014), de 7,35.

As unidades gnaisse, granitoide e filito possuem valores de mediana para condutividade elétrica próximos entre si, em torno de 200,00 µS/cm, bem como as unidades de migmatito e mica xisto, aproximadamente 130,00 µS/cm. A unidade

mármore, que abrange apenas uma amostra, se distingue das demais por apresentar alto valor de condutividade elétrica, 321,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ezaki et. al (2014) apresenta valores médios de condutividade elétrica para o SAC de 170,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, já o Departamento de Águas e Energia Elétrica (1981) apresenta valores inferiores a 260,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a área.

Algumas amostras coletadas em nascentes tendem a apresentar valores anômalos de concentração iônica se comparadas com outras amostras da mesma unidade litológica. Estes valores podem estar relacionados à influência antrópica, derivada do uso de fertilizantes agrícolas.

O apêndice A sintetiza os valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão das variáveis analisadas segundo as unidades em que as amostras foram coletadas.

6.3 Classificação hidroquímica

A fim de classificar as amostras segundo sua hidroquímica, utilizou-se o Diagrama de Piper (Figura 15), o qual se mostra uma boa ferramenta para caracterizar as águas do Sistema Aquífero Pré-Cambriano. Foi confeccionado um diagrama para as águas de cada unidade litológica e um para todo o SAC.

Em sua maioria, as amostras do grupo gnaisse podem ser classificadas como bicarbonatadas cálcicas-sódicas. Uma amostra pode ser classificada como cloretada sódica. Tal amostra, por ter sido coletada em nascente, tende a apresentar valores de concentração iônica anômalos em relação a outras amostras da mesma unidade. A alta concentração do ânion cloreto pode estar relacionada à poluição ligada a efluentes residenciais e industriais. Esta amostra está localizada na UGRHI do Alto Tietê, na Bacia do Rio Tietê (Figura 2), envolvendo a região da Grande São Paulo e caracterizada pela complexa atividade antrópica.

Das amostras que compõem o grupo de granitoides, oito podem ser classificadas como bicarbonatadas cálcicas e três são classificadas como bicarbonatadas sódicas. Destas últimas, duas amostras foram coletadas em nascente e uma próxima à superfície, o que pode explicar a grande diferença na concentração de íons em relação às outras amostras do mesmo grupo.

As águas do grupo mica xisto podem ser classificadas, em geral, como bicarbonatadas sódicas-cálcicas. Uma amostra, coletada em nascente, é

classificada como cloretada cálcica. Esta amostra se localiza na UGRHI do Alto Tietê, na Bacia do Rio Tietê (Figura 2), e o alto teor do ânion cloreto pode ser associado à contaminação por efluentes residenciais e industriais.

As águas das unidades metarenito, suíte alcalina, mármore e migmatito são classificadas como bicarbonatadas cálcicas.

A unidade de filitos abrange amostras bicarbonatadas cálcicas-sódicas.

Por fim, as águas do grupo indistinto podem ser classificadas, de forma geral, segundo o ânion predominante, como bicarbonatadas. Uma amostra pode ser classificada como sulfatada sódica. A maior parte do ânion sulfato encontrado nas águas provém de fontes de contaminação, sendo elas: descarga de efluentes residenciais e industriais, fertilizantes agrícolas, chuva ácida, atividade de mineração (oxidação de pirita).

De forma geral, predominam no Sistema Aquífero Pré-Cambriano águas bicarbonatadas cálcicas (Ca-Na-HCO_3 , Ca-Mg-Na-HCO_3) e, subordinadamente, bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3 , Na-Ca-HCO_3).

O diagrama de Stiff apresenta as fácies hidroquímicas para cada amostra, expressas em miliequivalente por litro (meq/L). A Figura 16 permite visualizar a distribuição espacial dos diagramas na área de estudo distinguidos por unidades litológicas.

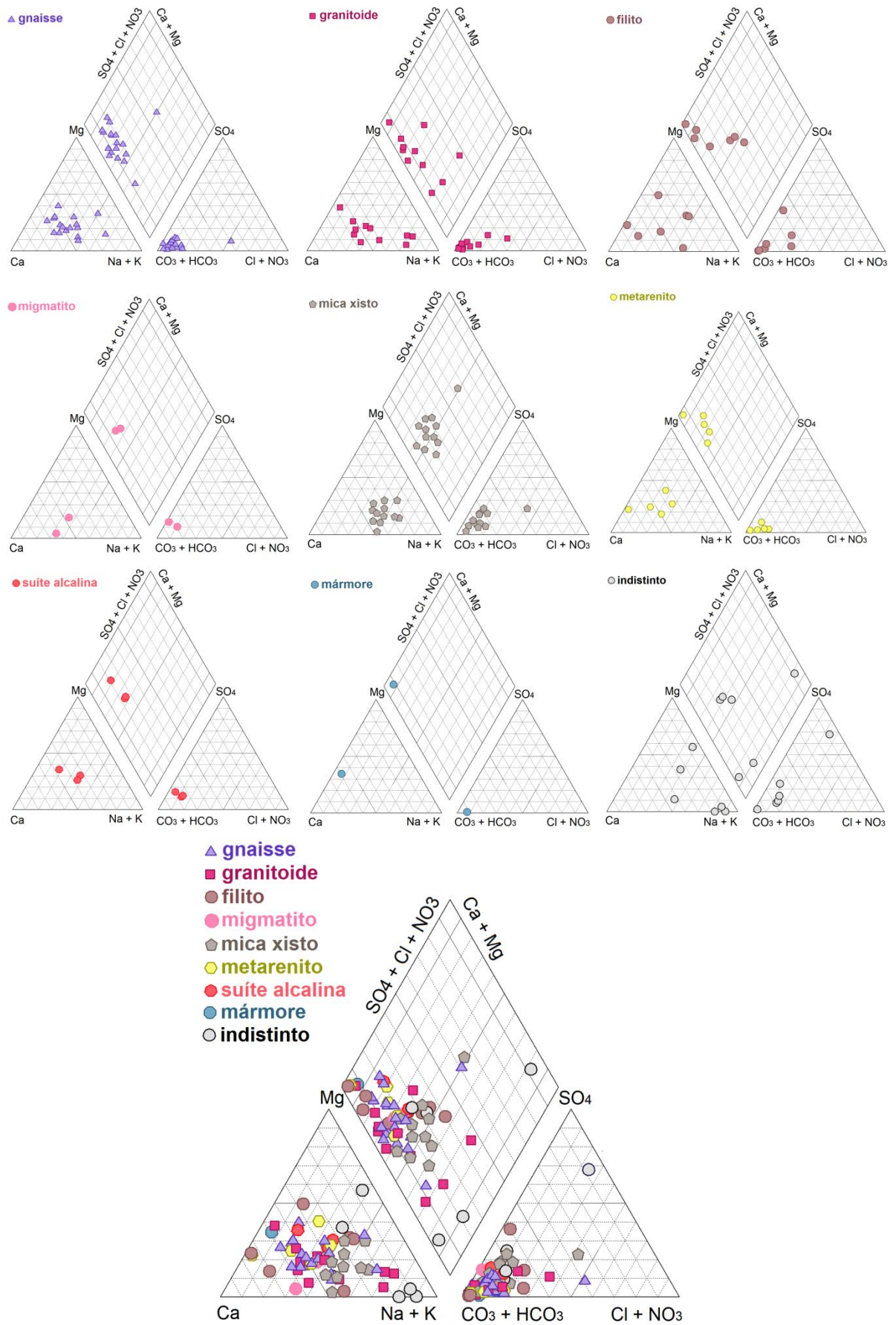


Figura 15. Diagramas de Piper para unidades litológicas e SAC.

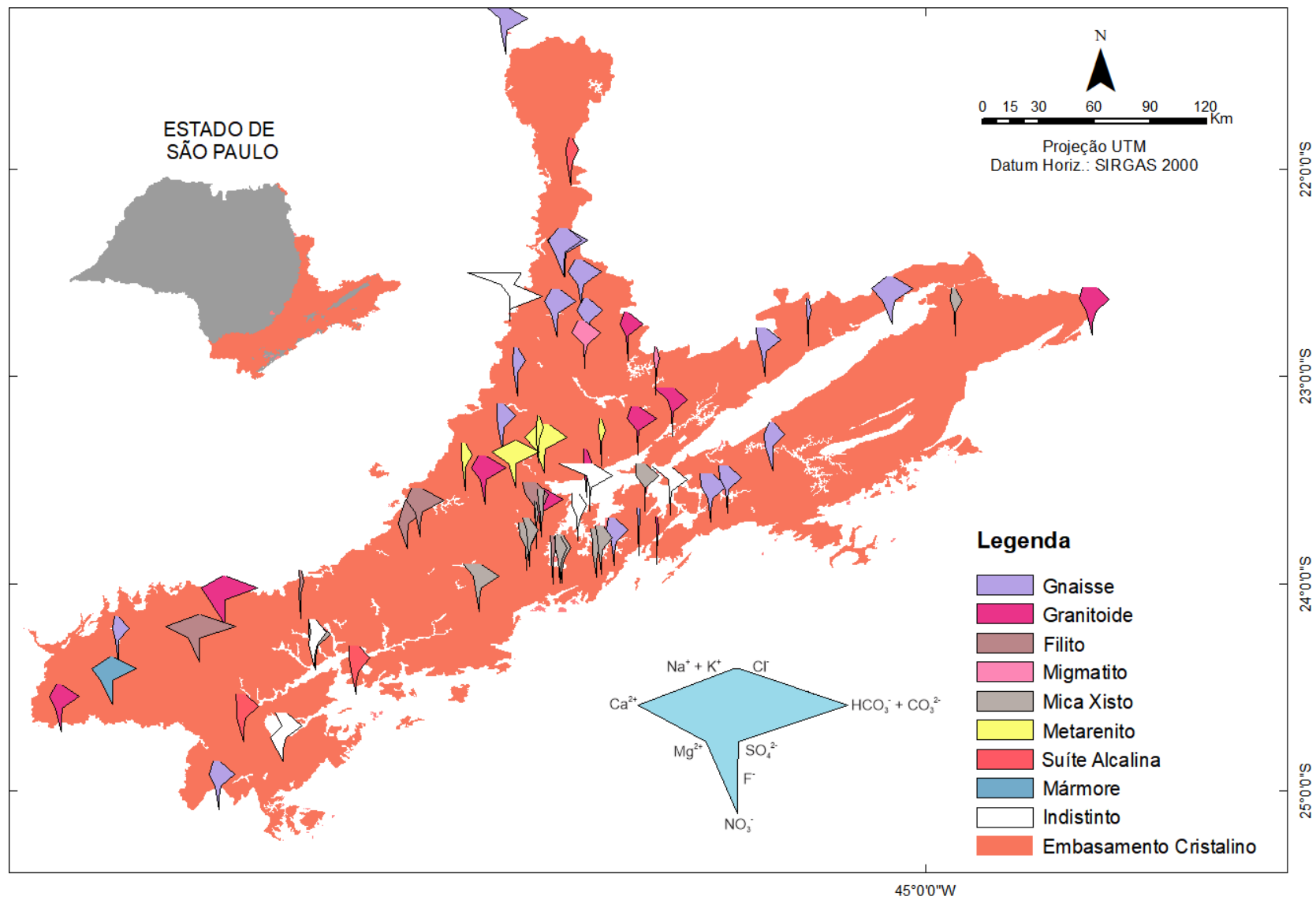


Figura 16. Distribuição espacial dos diagramas de Stiff.

6.4 Análise de agrupamentos dos dados hidroquímicos

Com o objetivo de verificar se existe relação entre a composição química das águas e as litologias encaixantes, utilizou-se o método da análise de agrupamentos.

A análise utilizou como variáveis as concentrações dos íons das amostras. Às amostras foram dados os rótulos segundo as unidades litológicas em que elas ocorrem (Figura 17).

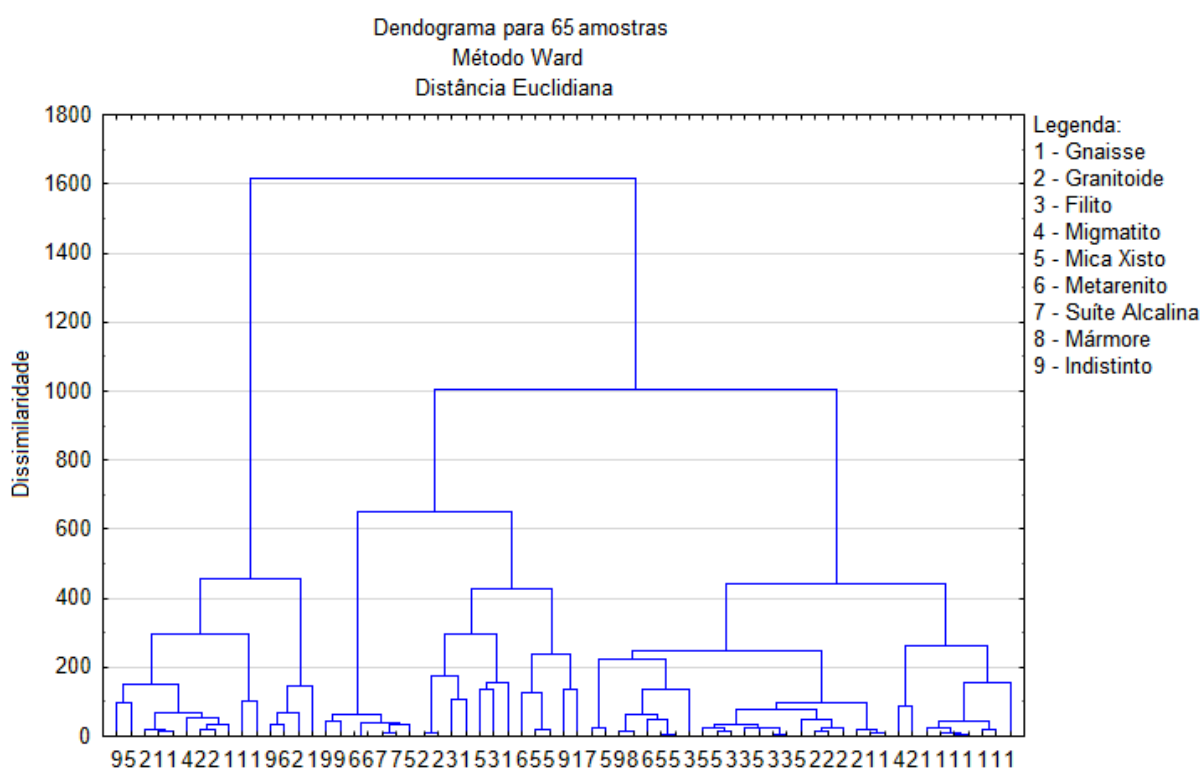


Figura 17. Dendograma da análise de agrupamentos para as amostras.

A análise não permitiu definir tipos hidroquímicos a partir das litologias, ainda que pôde ser observada semelhança entre amostras da mesma unidade. Nota-se similaridade entre algumas amostras de granitoides e gnaisses, que são rochas quartzo-feldspáticas, bem como entre filitos e mica xistos, rochas essencialmente micáceas.

A análise de agrupamentos feita para os dez íons que compõem esta análise hidroquímica (Figura 18) mostrou relação próxima entre os cátions. Pôde-se observar, também, relação entre os cátions e o ânion bicarbonato, o que pode indicar que este íon provém principalmente da alteração dos feldspatos.

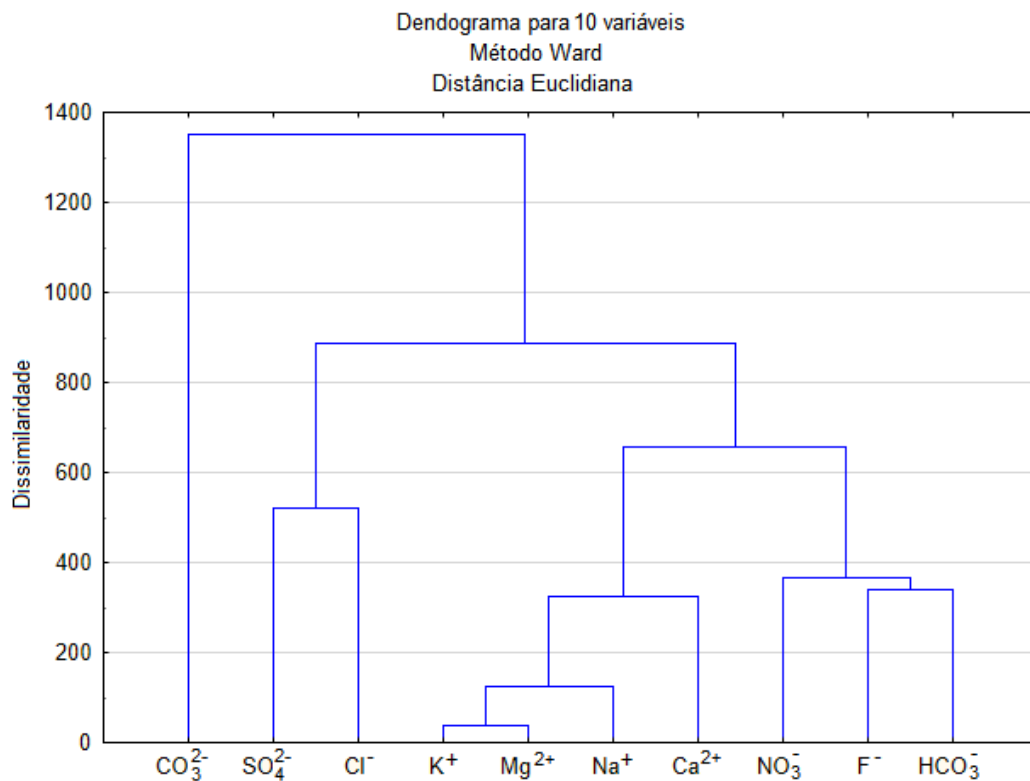


Figura 18. Dendograma da análise de agrupamentos para os íons.

6.5 Interações água-rocha

6.5.1 Rochas silicáticas

As rochas cristalinas são compostas essencialmente por quartzo e aluminossilicatos, como micas e feldspatos. Por terem se formado em condições físico-químicas muito distintas das encontradas na superfície da Terra, estes minerais são termodinamicamente instáveis e se dissolvem em contato com a água, ocorrendo dissolução incongruente envolvendo hidrólise (FREEZE & CHERRY, 2017).

A área de estudo, em decorrência de sua evolução geológica, apresenta rochas ígneas *in situ*, rochas metamórficas de protólito granítico e rochas sedimentares posteriormente afetadas por eventos deformacionais que deram origem a rochas metassedimentares e metavulcanossedimentares, de protólito pelítico.

relação desses cátions, podendo-se dizer que em parte das amostras predominam feldspatos alcalinos, em parte, plagioclásios cálcicos.

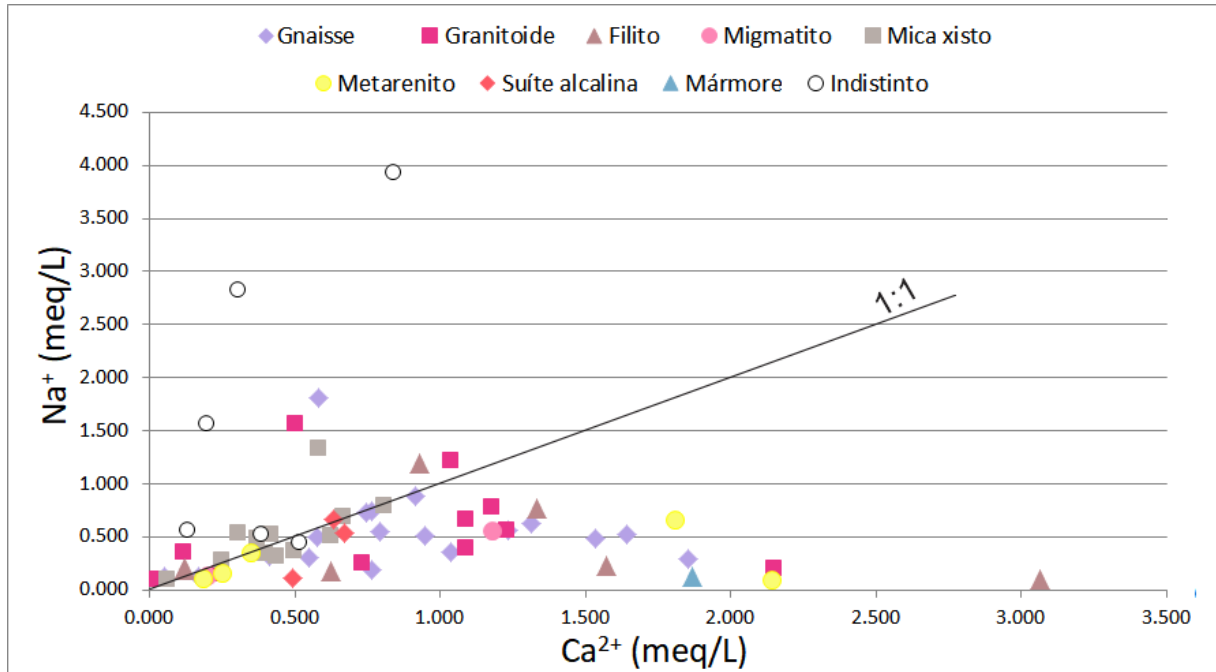


Figura 19. Correlação entre sódio e cálcio em águas do SAC.

Apesar dos feldspatos potássicos serem minerais essenciais na constituição de uma rocha granítica, as concentrações de potássio na água são baixas devido ao intemperismo extremamente lento destes minerais e a facilidade com que são absorvidos pelos retículos cristalinos de argilominerais como a illita, a partir da alteração das rochas (HITCHEON et al., 1999; apud GASTMANS et al., 2005.). A relação entre as razões iônicas rK^+/rNa^+ (Figura 20) ilustra a predominância do cátion sódio sobre o potássio. A presença de minerais magnesianos acessórios como a biotita é evidenciada pela razão iônica rMg^{2+}/rCa^{2+} , que é menor que 1 (Apêndice B) para a maior parte das amostras (Figura 21).

A matriz de correlação (Figura 22) indica que a presença do ânion bicarbonato nessas águas tem forte dependência dos cátions cálcio e magnésio, o que corrobora as reações de dissolução do plagioclásio cálcico e da biotita propostas.

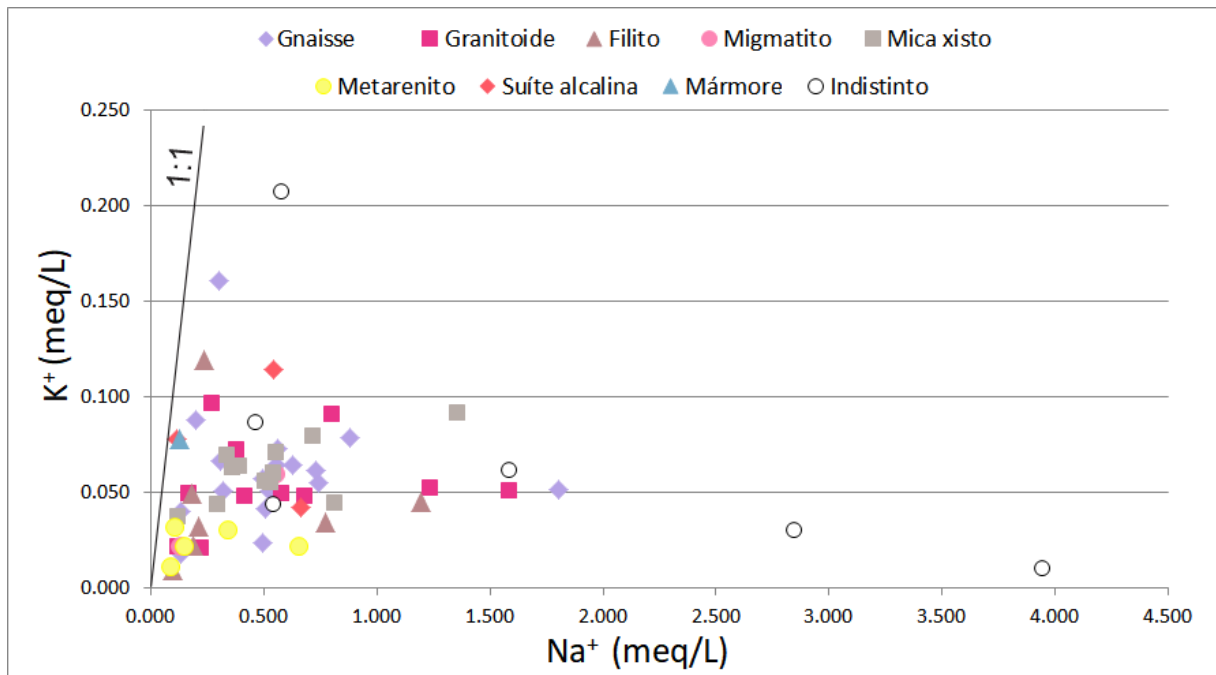


Figura 20. Correlação entre potássio e sódio em águas do SAC.

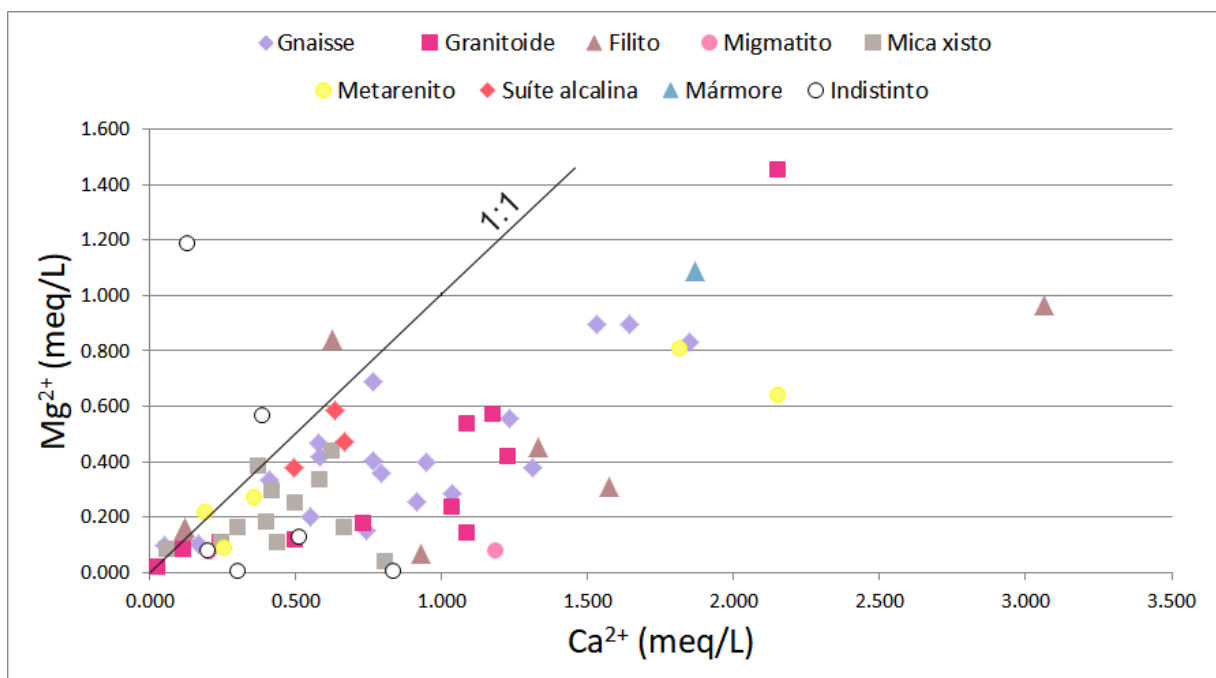


Figura 21. Correlação entre magnésio e cálcio em águas do SAC.

Modelos conceituais apontam perda de ferro (II) de minerais máficos como biotita e hornblenda e ganho acentuado de ferro (III) no solo na forma de óxido (Fe_2O_3) (ANDRADE et al., 2011).

6.5.1.2 Gnaisse

As rochas gnáissicas possuem origem metamórfica e seus protólitos variam desde ígneo félsico a rochas sedimentares arcoseanas, cuja mineralogia essencial é dada por mais de 20% de feldspatos (alcalinos e cálcicos), quartzo, biotita, hornblenda, granada, epidoto. Tendo a composição mineralógica essencial parecida com a dos granitoides, estas unidades terão características hidroquímicas semelhantes.

Segundo a classificação hidroquímica feita com o diagrama de Piper, as águas que percolam por esta unidade não apresentam grande variabilidade quanto ao cátion dominante. A razão rNa^+/rCa^{2+} permite visualizar que em algumas amostras esta proporção está próxima de 1 (Apêndice B) e, na maioria dos casos, abaixo deste valor.

As análises evidenciam uma maior influência da dissolução de minerais máficos, que podem ocorrer como bandas intercaladas às bandas quartzo-feldspáticas. Estes minerais podem ser biotita ($K(Mg,Fe)(AlSi_3O_{10})$), hornblenda ($((Na,K)Ca(Mg,Fe,Al,Ti)_5(Si_6Al_2)_8O_{22})$), epidoto ($Ca_2(Fe,Al)Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$) e granada ($((Ca,Mg,Fe^{2+},Mn)_3(Al,Fe^{3+},Mn,Cr,Ti^{4+})_2(SiO_4)_3)$). A forte correlação entre os cátions Mg^{2+} e Ca^{2+} pode ser explicada pela associação destes minerais na paragénese da rocha. O diagrama box plot mostra concentração superior de K^+ e Mg^{2+} (Figuras 14c e 14d) em comparação à unidade granitoide.

	CE	pH	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺
CE	1											
pH	0.4745	1										
HCO ₃ ⁻	0.8615	0.4361	1									
CO ₃ ²⁻	-0.1165	0.1492	-0.1778	1								
Cl ⁻	0.3889	0.3021	0.0526	0.2438	1							
SO ₄ ²⁻	0.1969	0.3445	-0.1450	0.1769	0.7782	1						
NO ₃ ⁻	0.0777	-0.0421	0.0603	-0.1819	-0.0278	-0.0075	1					
F ⁻	0.1969	0.3448	-0.1088	0.1486	0.7548	0.9158	-0.0132	1				
Ca ²⁺	0.8035	0.2967	0.8419	-0.2146	0.1369	0.0240	-0.0490	-0.0307	1			
Na ⁺	0.3658	0.4750	0.1249	0.1455	0.6897	0.7143	0.1172	0.8049	-0.0504	1		
Mg ²⁺	0.6012	0.2180	0.6699	0.0093	0.1562	-0.1578	0.0667	-0.2191	0.6409	-0.2350	1	
K ⁺	0.0690	0.2124	0.0985	0.3763	-0.0156	-0.0824	0.0107	-0.1983	-0.0100	-0.0847	0.2463	1

Figura 22. Matriz de correlação para as variáveis hidroquímicas (valores em negrito mostram grau de significância $p < 0,0001$).

6.5.1.3 Filito

Filitos são rochas metassedimentares de granulação muito fina, originadas do metamorfismo de baixo grau em rochas pelíticas. Compostas por sericita ($\text{KAl}_2\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), clorita ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_{12}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$) e quartzo.

As amostras desta unidade apresentam grande variabilidade quanto aos cátions e ânions dominantes. A clorita é geralmente encontrada como produto da alteração de minerais máficos. Em razão disso, as águas desta unidade possuem alta concentração de Mg^{2+} , bem como maior concentração de Ca^{2+} em relação ao Na^+ . A alta concentração de cálcio também pode ser explicada por um provável protólito pelítico rico em plagioclásio cálcico. Apesar de a sericita ser uma fonte de potássio, parte deste cátion é absorvida pelos minerais.

6.5.1.4 Migmatito

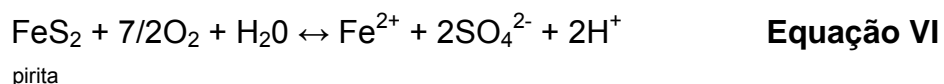
Migmatitos são rochas híbridas, em parte metamórficas, em parte ígneas, de alto grau metamórfico. São formados predominantemente a partir de granitoides, uma vez que rochas de composição básica dificilmente se fundem na crosta com o grau geotérmico normal. Pode-se esperar, então, um comportamento hidroquímico semelhante à unidade de granitoides.

6.5.1.5 Mica xisto

Mica xisto é uma rocha composta por quartzo, mais de 30% de filossilicatos, podendo ser biotita ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$), muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$), clorita ($(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_{12}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$), e até 20% de feldspatos (alcalinos ou cálcicos). Pode ter granulação fina a grossa.

A análise das amostras mostra uma relação $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$ próxima ou maior que 1 para a maioria dos casos. Isso mostra que o feldspato mais presente nas rochas desta unidade é o sódico, na forma de albita. As concentrações de K^+ são elevadas se comparadas às outras unidades, devido à dissolução das micas potássicas. Os baixos teores de concentração Mg^{2+} nestas águas devem-se à absorção deste cátion na formação de argilominerais.

A pirita, cuja reação de oxidação é dada pela Equação VI, pode ser encontrada como mineral acessório em mica xistos e justifica a elevada concentração de sulfato, se comparado com outras unidades.



6.5.1.6 Metarenito

Metarenito é uma rocha metamórfica de grau incipiente, protólito sedimentar (arenito), na qual os grãos reliquiares são preservados, não havendo recristalização total dos cristais. É composta essencialmente por quartzo (60%), feldspato potássico ou plagioclásio e minerais micáceos como acessórios.

O cátion predominante nesta unidade é o Ca^{2+} , apresentando razões $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$ menores que 1 (Apêndice B) para a maioria das amostras. Pode-se dizer, dessa forma, que o feldspato de maior ocorrência nestas rochas é o plagioclásio cálcico. O cálcio presente nestas águas também pode ser relacionado à arenitos com cimentos carbonáticos. As significativas concentrações de Mg^{2+} se devem à dissolução de minerais micáceos, como biotita e clorita.

6.5.1.7 Suíte Alcalina

Suíte alcalina é a denominação para uma associação de diversas rochas provindas de magmatismo alcalino, portanto, formadas essencialmente por feldspatos alcalinos e feldspatoides, podendo ocorrer também anfibólios e piroxênios alcalinos.

As razões $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$ para as águas desta unidade são próximas de 1 (Apêndice B), indicando que há uma contribuição de íons cálcicos a partir de reações de alteração de minerais provavelmente da classe dos anfibólios e piroxênios. Pode-se dizer, segundo o diagrama box plot (Figura 14c), que esta é a unidade com maiores concentrações de K^+ .

A condutividade elétrica apresenta forte correlação com os íons bicarbonato, cálcio e magnésio (Figura 22), o que indica que este parâmetro pode estar relacionado à dissolução do plagioclásio cálcico e minerais micáceos.

A condutividade elétrica também apresenta correlação com o pH (Figura 23), provavelmente relacionado ao controle do íon bicarbonato, o mais abundante nas águas do SAC.

A alta correlação entre os íons Na^+ e Cl^- (Figura 22) pode indicar recarga do aquífero por precipitação afetada por dissolução de sais de água meteórica.

Os ânions Cl^- e SO_4^{2-} não são constituintes importantes em rochas silicáticas, portanto, não há tendência de formação de fácies a partir destes ânions durante a percolação de água subterrânea nestas rochas (FREEZE & CHERRY, 2017).

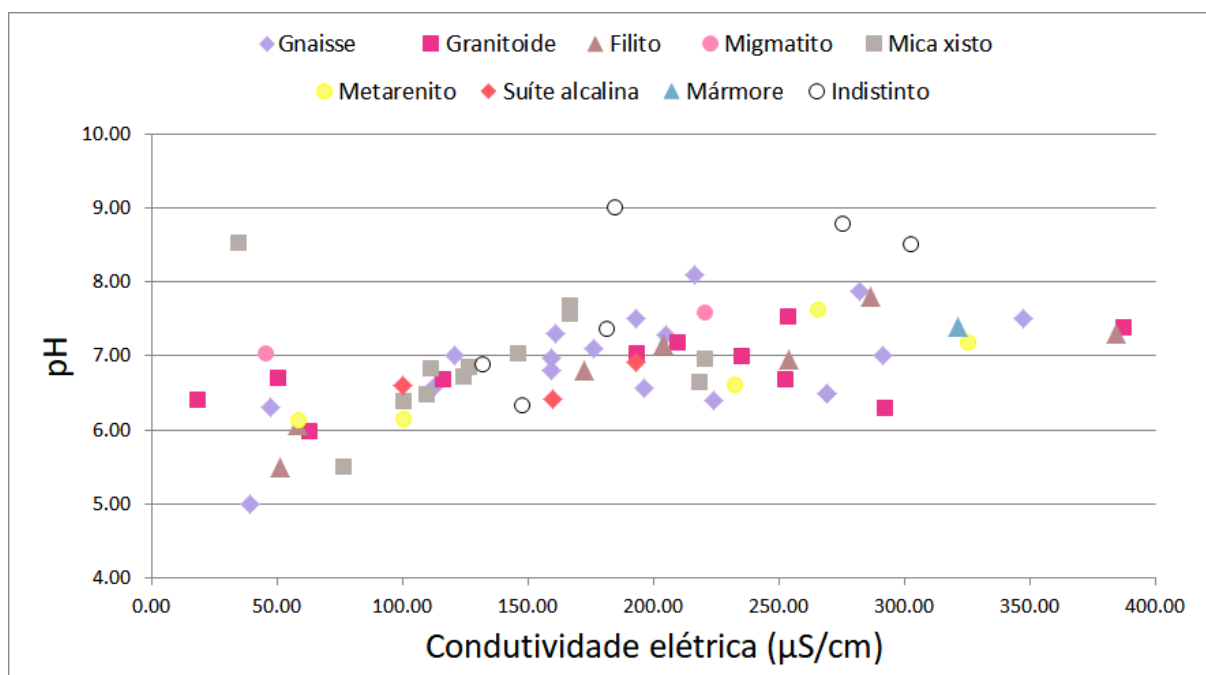


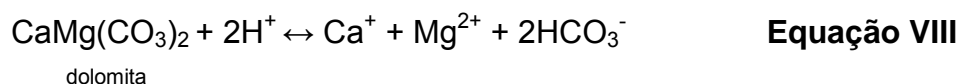
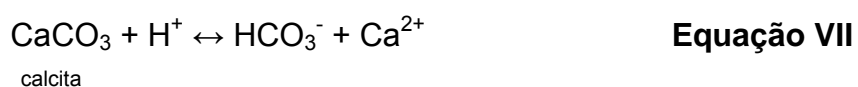
Figura 23. Correlação entre pH e condutividade elétrica em águas do SAC.

6.5.2 Rochas carbonáticas

6.5.2.1 Mármore

As rochas de composição carbonática na área de estudo são representadas pelo mármore, que é uma rocha metamórfica constituída principalmente pelos minerais calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). A água que percola por esta

unidade dissolve estes minerais até atingir seus níveis de saturação. À medida que acontece a dissolução destes minerais carbonatados, os valores de pH e as concentrações de HCO_3^- na água, em sistema aberto, tendem a aumentar, segundo as equações VII e VIII (FREEZE & CHERRY, 2017). O ânion bicarbonato mostra forte correlação com os cátions de cálcio e magnésio (Figura 22). A ausência do ânion carbonato (Figura 14g) pode ser explicada pelo consumo deste para formar o ânion bicarbonato, segundo a equação IX. Pode-se aplicar as reações de dissolução/precipitação dos minerais calcita e dolomita em meio aquoso:



7 CONCLUSÕES

Diversos trabalhos na literatura hidrogeológica abordam a influência da composição mineral das rochas no quimismo das águas subterrâneas. Busca-se entender as reações químicas que atuam nos sistemas a fim de criar modelos que expliquem a evolução geoquímica das águas.

Com base nas hipóteses que nortearam este trabalho, avaliou-se os dados hidroquímicos e geológicos através de métodos geoestatísticos que resultaram em gráficos e mapas, possibilitando a visualização da distribuição espacial das concentrações das variáveis hidroquímicas.

O principal ânion presente nas águas é o bicarbonato (HCO_3^-) e os principais cátions o cálcio (Ca^{2+}) e o sódio (Na^+). A presença marcante destes íons é decorrente de reações de intemperismo dos minerais que compõem as rochas. O ânion bicarbonato se origina principalmente de reações entre CO_2 (produto da decomposição bacteriana dissolvido na água) e silicatos, como foi mostrado na Equação III. A presença dos cátions cálcio e sódio se relaciona à predominância de feldspatos cálcicos e sódicos nas rochas. O cálcio também provém da cimentação das rochas por minerais carbonáticos, uma vez que a taxa de alteração destes minerais é mais rápida do que a dos silicatos.

Estes resultados permitiram classificar as águas do Aquífero Pré-Cambriano, através do Diagrama de Piper, como bicarbonatadas cálcicas (Ca-Na-HCO_3 , Ca-Mg-Na-HCO_3) e, subordinadamente, bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3 , Na-Ca-HCO_3).

Os valores médios de pH (6,97) e condutividade elétrica (181,22 $\mu\text{S/cm}$) para a área de estudo corroboram valores previamente publicados na literatura.

Altos teores dos íons cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}), em especial em amostras de água coletadas em nascentes, podem estar relacionados à contaminação por efluentes residenciais e industriais. Faz-se necessária investigação mais detalhada acerca da fonte poluidora e possíveis medidas de recuperação ou mitigação do passivo ambiental.

Como recomendação, sugere-se à Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) a inclusão do parâmetro concentração de sílica em suas análises hidroquímicas, considerando-se que os principais minerais formadores de rocha são

silicatos e este parâmetro permitiria refinar a geoestatística e estabelecer um modelo de evolução geoquímica mais completo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. de. et al. *Províncias estruturais brasileiras*. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8., 1977, Campina Grande. Anais... Recife: SBG - Núcleo NE, p. 363-391.

ALMEIDA, F. F. M. de; HASUI, Y. (Coords). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Bluncher. 378p. 1984.

ALVARES, C. A.; STAPE J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. *Köppen's Climate Classification Map for Brazil*. Meteorologische Zeitschrift. 22: 711-728. 2013.

ARCGIS. Versão 10.3.0.4322. Esri Inc., 2014.

BIOESTAT. Versão 5.0. 2007.

CLIMATE-DATA.ORG. *Dados climáticos para cidades mundiais*. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em: 11 de julho de 2018.

COHEN, K. M.; FINNEY, S. C.; GIBBARD, P. L.; FAN, J. *The ICS International Chronostratigraphic Chart*. Episodes 36: 199-204. (2013; updated). Disponível em: <<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-08.pdf>>. Acesso em: 20 de julho de 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. *Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo 2013-2015*. São Paulo, CETESB. 2016. 308 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. *Meio Ambiente Paulista: Relatório De Qualidade Ambiental 2017/Secretaria do Meio*

Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo: SMA, 2017. 344 p. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/category/pub>>. Acesso em: 15 de julho de 2018.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/DAEE. *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 4. Sorocaba*. São Paulo, DAEE, 2 v. 1981.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/DAEE. *Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo*. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em: 11 de julho de 2018.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE/SERH; INSTITUTO GEOLÓGICO – IG/SMA; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT/SCTDE; CPRM-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala: 1:1.000.000 / Rocha, G. A. (Coord. Geral)*. São Paulo, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; LABORATÓRIO DE ESTUDO DE BACIAS - LEBAC/IGCE. *Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. Diretrizes de Utilização e Proteção*. São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013. 44p.

DIAGRAMMES. Versão 6.51. Roland Simler/Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, 2017.

ENGELBRECHT, B. Z. *Modelo Conceitual de Circulação de Água Subterrânea em Aquífero Cristalino no Município de Itu/SP*. 2017. Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017. 88f.

EZAKI, S. *Hidrogeoquímica dos Aquíferos Tubarão e Cristalino na Região de Salto (SP)*. Tese (doutoramento). IGc/USP. 2011. 180p.

EZAKI, S.; ODA, G. H.; IRITANI, M. A.; VEIGA, C.; STRADIOTO, M. *Hidroquímica dos aquíferos Tubarão e Cristalino na região de Indaiatuba-Rafard, Estado de São Paulo*. Pesquisas em Geociências. 41 (1): 65-79. Porto Alegre/RS. 2014.

FEITOSA, F. A. C. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações / organização e coordenação científica / Feitosa, F. A. C. et al.* 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FERNANDES, A. J.; PERROTTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; AZEVEDO, S. G.; GIMENEZ FILHO, A.; PAULON, N. *Potencial dos Aquíferos Fraturados do Estado de São Paulo: Condicionantes Geológicos*. 2007. *Águas Subterrâneas*. 21. 65-84.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Tradução de Everton de Oliveira [et al.] Everton de Oliveira (Coord.) *Águas Subterrâneas*. Edição Instituto Água Sustentável. São Paulo (SP). 2017.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. 4ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598p.

GASTMANS, D.; ALBERTO, M. C.; BUFON, A. G. M.; MORAES, F. T.; SANTOS, M. M.; SILVA, J. R. M.; CHANG, H. K. *Implicações Hidroquímicas da Interação Rocha-Água: Interpretações Através da Representação Gráfica de Análises Químicas de Águas Subterrâneas*. In: II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, São Paulo. 2005.

GASTMANS, D.; MENEGÁRIO, A. A.; MOURA, C. C. *Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Aquífero Serra Geral na Porção Centro Sul do Estado de São Paulo*. *Águas Subterrâneas*. 2013. 27. 27-44.

GEOSGB/CPRM. *Sistema de Dados, Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil*. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 25 de abril de 2018.

HASUI, Y. *Sistema Orogênico Mantiqueira*. In: Hasui, Y.; Carneiro, C. D. R.; Almeida, F. F. M. de; Bartorelli, A. (Coords.) *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca, p. 331-372. 2012.

HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. *Os Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade Hídrica e Vulnerabilidade à Poluição*. *Revista Brasileira de Geociências*. 2001. 31. 43-50.

HIRATA, R. C. A.; SUHOGUSOFF, A. V.; FERNANDES, A. J. *Groundwater Resources in the State of São Paulo*. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências - AABC*. São Paulo. 2007.

HYPOLITO, R.; ANDRADE, S.; EZAKI, S. *Geoquímica Da Interação: Água, Rocha, Solo: Estudos Preliminares*. São Paulo: All Print Editora, 2011. 456p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Mapa de Biomas do Brasil [mapa]*. 2004a. Escala 1:5.000.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Mapa de Vegetação do Brasil [mapa]*. 2004b. 3ª edição. Escala 1:5.000.000.

LOGAN, J. *Interpretação de Análises Químicas da Água*. US. Agency for International Development, Recife, 75p. 1965.

MAGALHÃES, V. S. *Hidroquímica e qualidade das águas superficiais e subterrâneas em áreas sob influência de lavras pegmatíticas nas Bacias dos Córregos Água Santa e Palmeiras, Município de Coronel Murta (MG)*. Dissertação (Mestrado) - IGC/UFMG, 2006.

MICROSOFT Excel 2010. Versão 14.0.7212.5000. Microsoft Corporation, 2010.

NEVES, M. A. *Análise Integrada Aplicada à Exploração De Água Subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)*. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2005.

PIPER, A. M. *A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses*. Trans Am Geophys Union. 1944. 25: 914–923.

PROJETO HIDROGEO BASE. Laboratório De Hidrologia E Hidrogeologia Operacional. Disponível em:

<<http://www.ourinhos.unesp.br/#!/laboratorios/hidrologia-e-hidrogeologia-operacional/>>. Acesso em 10 de agosto de 2018.

REBOUÇAS, A. C. *Groundwater in Brazil*. EPISODES, v. 11, n. 3, p. 209–214, 1988.

REGHUNATH, R.; SREEDHARA MURTHY, T. R.; RAGHAVAN, B. R. *The Utility of Multivariate Statistical Techniques in Hydrogeochemical Studies: an Example from Karnataka, India*. Water Research. 36: 2437-2442. 2002.

ROCKWORKS 15. Versão 2010.7.2. RockWare Incorporated. 2010.

STATISTICA. Versão 10. StatSoft, Inc. 2011.

STIFF, H.A. *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns*. Journal of Petroleum Technology, v. 3, n° 10, p. 15-17. 1951.

STRECKEISEN, A. L. *Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. (Final report of an inquiry.)* Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Abhandlungen, 107, 144-240. 1967.

ANEXO A

Dados hidroquímicos,
hidrogeológicos e litológicos
de amostras

Pontos de coleta				Dados geográficos				Dados hidrogeológicos		Dados hidroquímicos (meq/L)													Dados geológicos		
Número da amostra	Código CESTESB	Ano	Campanha	Município	Descrição	Latitude	Longitude	Profundidade de captação (m)	UGRHI	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ₂ ⁺	Na ⁺	Mg ₂ ⁺	K ⁺	Condutividade elétrica (µS/cm)	pH	e%	Unidade	Litologia	Era/Período
1314987	PC0056P	2013	1	ITAPIRA	PM- Barão Ataliba Nogueira	-22,3894	-46,7406	25 a 113	9	2,016	0,067	0,186	0,073	0,001	0,006	1,642	0,522	0,897	0,051	269	6,5	14,0%	Rio Capivari	Trondhjemito, Gnaiss, Migmatito, Ortognaisse	Neoarqueano
1528811	PC0060P	2015	2	JAMBEIRO	P4 - Sabesp	-23,3256	-45,7406	48 a 199	2	1,164	0,000	0,107	0,037	0,002	0,005	0,763	0,197	0,689	0,088	193	7,5	13,9%	Rio Capivari	Trondhjemito, Gnaiss, Migmatito, Ortognaisse	Neoarqueano
1402021	PC0094P	2014	2	PEDRA BELA	P2 - Sabesp -	-22,7919	-46,4392	37 a 180	5	1,295	0,067	0,028	0,042	0,002	0,011	0,729	0,268	0,183	0,097	116	6,7	-6,15%	Socorro, Suíte Bragança Paulista	Granodiorito, Monzonito, Sienito	Neoproterozóico
1406496	PC0098P	2014	1	PIEDADE	P1- Sabesp - B. dos Leites	-23,7008	-47,5011	32 a 251	10	1,293	0,067	0,095	0,038	0,002	0,010	0,624	0,180	0,840	0,049	172,2	6,8	5,90%	São Roque, Formação Piragibu	Filito, Quartzito, Metaconglomerado, Metabrecha, Metabasito	Neoproterozóico
1406497	PC0099P	2014	1	PIEDADE	P1A, Sabesp - B. Jurupará	-23,6442	-47,4403	10 a 180	10	2,130	0,067	0,133	0,167	0,003	0,044	1,332	0,774	0,453	0,034	286,5	7,8	0,96%	São Roque, Formação Piragibu	Filito, Quartzito, Metaconglomerado, Metabrecha, Metabasito	Neoproterozóico
1325139	PC0131P	2013	2	SAO MIGUEL ARCANJO	P1 - Sabesp Abaitinga	-24,0386	-48,0172	24 a 151	14	0,246	0,067	0,112	0,021	0,003	0,053	0,117	0,189	0,152	0,022	51	5,5	-2,10%	Votuverava, unidade terrígena	Filito, Metarenito, Metaconglomerado, Metassilito	Mesoproterozóico
1401483	PC0145P	2014	1	TUIUTI	P1 - Sabesp, Poço Arraial	-22,8325	-46,6467	26 a 141	5	1,393	0,067	0,028	0,250	0,003	0,011	1,183	0,552	0,081	0,059	220	7,6	3,42%	Varginha-Guaxupé, unidade ortognáissica migmatítica intermediária	Anatexito, Gnaiss Granítico, Migmatito Estromático, Gnaiss Tonalítico	Neoproterozóico
1401389	PC0148P	2014	1	VALINHOS	PM Poço San Fernando	-22,9656	-46,9725	19 a 150	5	0,721	0,067	0,056	0,010	0,003	0,016	0,411	0,318	0,334	0,051	113	6,6	12,1%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1415642	PC0154N	2014	1	SAO ROQUE	Nascente Mineração Estância São Roque	-23,4864	-47,1275	Nascente	10	0,516	0,067	0,028	0,021	0,003	0,005	0,112	0,373	0,086	0,073	62,6	6	0,31%	Granitóide São Roque	Granodiorito, Biotita Monzogranito	Neoproterozóico
1415643	PC0155P	2014	1	SAO ROQUE	Poço Mineração São Roque	-23,4861	-47,1281	32 a 186	10	1,835	0,067	0,070	0,062	0,003	0,014	1,223	0,574	0,425	0,050	235	6,99	5,09%	Granitóide São Roque	Granodiorito, Biotita Monzogranito	Neoproterozóico
1427189	PC0162P	2014	2	SAO PAULO	Escola Técnica Federal - DAEE	-23,5228	-46,6225	43 a 320	6	1,999	0,067	0,361	0,208	0,003	0,123	0,298	2,840	0,008	0,031	302	8,53	7,02%	Depósitos aluvionares	Areia, Cascalho	Cenozóico
1415471	PC0163P	2014	1	EMBU	Empresa de Águas Criss	-23,6394	-46,8569	53 a 262	6	1,934	0,067	0,132	0,180	0,003	0,060	1,033	1,231	0,241	0,053	253	7,55	3,69%	Granitóides indiferenciados, sinorogênicos, do Terreno Embu	Granito, Granodiorito, Monzogranito, Tonalito	Neoproterozóico
1518232	PC0171P	2015	1	COTIA	P2 Cotia Foods	-23,6150	-46,8839	34 a 290	6	1,129	0,067	0,072	0,722	0,003	0,071	0,928	1,196	0,070	0,045	254	6,95	4,09%	Votuverava, unidade terrígena	Filito, Metarenito, Metaconglomerado, Metassilito	Mesoproterozóico
1518237	PC0173P	2015	1	MOJI DAS CRUZES	SPAL	-23,5408	-46,2317	-	6	1,529	0,000	0,028	0,036	0,003	0,044	0,194	1,579	0,086	0,062	181	7,38	7,88%	Depósitos aluvionares	Areia, Cascalho	Cenozóico
1530538	PC0174N	2015	2	ITAPECERI CA DA SERRA	Crystal Fonte Del Rey	-23,7044	-46,8811	Nascente	6	0,155	0,067	0,051	0,021	0,003	0,005	0,054	0,114	0,088	0,038	34	8,55	-1,23%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzito Xisto	Neoproterozóico
1518238	PC0178P	2015	1	POA	Mineração Planeta Água	-23,5225	-46,3564	-	6	1,234	0,067	0,075	0,117	0,003	0,012	0,803	0,809	0,042	0,045	166	7,69	5,97%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzito Xisto	Neoproterozóico
1518233	PC0180N	2015	1	EMBU	Empresa de Águas Criss	-23,6464	-46,8567	Nascente	6	0,169	0,067	0,276	0,150	0,003	0,005	0,242	0,289	0,111	0,045	76	5,52	1,27%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzito Xisto	Neoproterozóico
1512326	PC0181P	2015	2	LINDOIA	PM Poço da Laje	-22,5414	-46,6592	36 a 220	9	1,737	0,067	0,020	0,127	0,003	0,006	1,312	0,626	0,379	0,064	216	8,1	9,73%	Amparo, unidade de migmatitos tonalito-trondhjemíticos	Trondhjemito, Ortognaisse, Migmatito Estromático	Mesoarqueano
1329042	PC0183P	2013	2	SAO PAULO	P1 Sabesp-Parelheiros	-23,8689	-46,7561	82 a 240	6	0,726	0,067	0,086	0,202	0,003	0,053	0,495	0,385	0,253	0,064	218	6,65	2,62%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzito Xisto	Neoproterozóico
1415467	PC0184P	2014	1	EMBU-GUACU	P2 - Sabesp	-23,8722	-46,8011	31 a 150	6	0,257	0,067	0,102	0,071	0,003	0,005	0,122	0,209	0,163	0,032	58	6,06	1,91%	Embu, unidade de sericita xistos	Filito, Sericita Xisto	Neoproterozóico
1317837	PC0192N	2013	1	RIO GRANDE DA SERRA	Fontanário	-23,7378	-46,3872	Nascente	6	0,033	0,067	0,129	0,021	0,003	0,053	0,052	0,134	0,100	0,018	39,3	5	-0,40%	Embu, unidade paragnáissica	Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1428594	PC0193N	2014	2	SANTO ANDRE	Paranapiacaba	-23,7794	-46,2981	Nascente	6	0,038	0,067	0,064	0,021	0,003	0,005	0,025	0,114	0,023	0,022	18	6,41	-3,95%	Granito Taiaçupeba	Biotita Granito	Cambriano
1528804	PC0200P	2015	2	BANANAL	P1- Sabesp - Distrito Rancho Grande	-22,6719	-44,1975	22 a 101	2	1,557	0,000	0,421	0,315	0,003	0,005	1,173	0,796	0,574	0,091	292	6,3	6,72%	Quirino	Granito, Granodiorito, Quartzito-Diorito	Paleoproterozóico

Pontos de coleta				Dados geográficos				Dados hidrogeológicos		Dados hidroquímicos (meq/L)													Dados geológicos		
Número da amostra	Código CESTESB	Ano	Campanha	Município	Descrição	Latitude	Longitude	Profundidade de captação (m)	UGRHI	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ₂ ⁺	Na ⁺	Mg ₂ ⁺	K ⁺	Condutividade elétrica (µS/cm)	pH	e%	Unidade	Litologia	Era/Período
1518978	PC0209P	2015	1	CAJAMAR	P4 – Sabesp	-23,3364	-46,8422	-	6	1,999	0,067	0,454	0,090	0,003	0,005	1,811	0,657	0,810	0,021	325	7,2	11,5%	São Roque, Formação Estrada dos Romeiros	Metarenito Quartzoso, Metapelito, Metarritmito	Neoproterozóico
1415469	PC0214P	2014	1	SAO PAULO	Poço 01 – Fonte Sonja	-23,6656	-46,6803	88 a 252	6	0,731	0,067	0,093	0,291	0,003	0,008	0,509	0,461	0,133	0,087	131,6	6,89	-0,14%	Resende	Arenito, Conglomerado, Diamictito, Lamito	Cenozóico
1512101	PC0224P	2015	1	AGUAS DA PRATA	Águas da Prata Ltda (Pq. das Águas da Prata)	-21,9494	-46,7119	-	9	0,656	0,067	0,045	0,144	0,003	0,016	0,494	0,113	0,378	0,078	100	6,6	6,61%	Complexo Alcalino Poços de Caldas	Fonolito, Tufito, Pseudoleucita Fonolito	Cretáceo
1507577	PC0228P	2015	2	APIAI	P1- Sabesp, Bairro do Encapoeira do	-24,4553	-48,9272	25 a 180	11	2,278	0,000	0,174	0,024	0,003	0,013	1,866	0,124	1,086	0,077	321	7,4	11,7%	Água Clara, unidade carbonática	Rocha Calcissilicática, Mármore Calcítico	Mesoproterozoico
1518239	PC0234P	2015	1	BIRITIBA-MIRIM	Poço Irohi, Sabesp - Estrada Mogi-Salesópolis km18	-23,5739	-46,0386	6 a 140	6	1,441	0,067	0,144	0,200	0,003	0,054	0,913	0,883	0,257	0,079	205	7,28	5,52%	Costeiro, unidade ortognáissica	Gnaiss, Migmatito, Ortognaiss, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1302076	PC0237P	2013	1	CAJATI	P1 - Sabesp - Vila Deco	-24,7294	-48,1003	68 a 118	11	1,332	0,333	0,307	0,208	0,003	0,026	0,126	0,574	1,193	0,207	184	9,03	-2,54%	Depósitos aluvionares	Areia, Cascalho	Cenozoico
1507578	PC0238P	2015	2	CAPAO BONITO	P1 - Sabesp - Ferreira dos Matos	-24,0667	-48,3850	35 a 60	14	3,048	0,000	0,178	0,042	0,004	0,005	2,146	0,214	1,457	0,021	387	7,4	7,89%	Granitóide Capote, Complexo Três Córregos	Monzogranito	Neoproterozóico
1409853	PC0243P	2014	1	ELDORADO	P1- Sabesp Barra do Braço	-24,6361	-48,2933	28 a 81	11	1,386	0,000	0,216	0,208	0,005	0,026	0,634	0,661	0,584	0,042	193	6,92	2,10%	Atuba, Gnaiss Itapeúna	Diorito, Gnaiss, Gnaiss Granítico, Biotita Monzogranito	Paleoproterozóic
1507576	PC0248P	2015	2	ITAPIRAPU A PAULISTA	P2 - Sabesp - Sede	-24,5875	-49,1725	40 a 118	11	1,622	0,000	0,036	0,111	0,007	0,038	1,083	0,412	0,540	0,048	209,3	7,2	6,89%	Granito Arrieiros	Granodiorito, Monzogranito	Neoproterozoico
1530360	PC0251P	2015	2	JOANOPOLIS	Poço do Bairro do Mosquito Sabesp	-22,9594	-46,3028	17 a 210	5	0,257	0,067	0,035	0,042	0,007	0,005	0,200	0,131	0,080	0,021	45	7,04	2,09%	Varginha-Guaxupé, unidade ortognáissica migmatítica intermediária	Anatexito, Gnaiss Granítico, Migmatito Estromático, Gnaiss Tonalítico	Neoproterozóico
1413238	PC0254P	2014	1	MAIRIPORA	P7 - Sabesp - Jardim Sandra	-23,3053	-46,5669	26 a 154	6	0,297	0,067	0,028	0,045	0,008	0,007	0,254	0,151	0,091	0,021	232	6,63	6,87%	São Roque, Formação Estrada dos Romeiros	Metarenito Quartzoso, Metapelito, Metarritmito	Neoproterozóico
1302078	PC0257P	2013	1	MIRACATU	Poço P1 - Sabesp - Engano	-24,0083	-47,1558	6 a 130	11	1,524	0,333	0,227	0,214	0,008	0,039	0,579	1,353	0,341	0,092	220	6,98	0,40%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1528815	PC0260P	2015	2	MONTEIRO LOBATO	P1 - São Benedito - Sabesp	-22,8686	-45,7767	30 a 250	2	1,426	0,000	0,083	0,078	0,009	0,007	0,763	0,744	0,404	0,055	224	6,4	10,2%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1500359	PC0262P	2015	2	NAZARE PAULISTA	Poço Bairro Cuiabá - Est. Cuiabá - Sabesp	-23,2489	-46,3881	21 a 233	5	1,591	0,067	0,028	0,035	0,010	0,017	1,083	0,674	0,148	0,048	193	7,04	5,57%	Granito Pedra Branca	Granodiorito, Biotita Granito	Neoproterozóico
1406492	PC0271P	2014	1	RIBEIRAO BRANCO	P1 - Sabesp - Margem do rio Taquari-Guaçu - Itaboa	-24,2617	-48,8981	96 a 135	14	0,942	0,067	0,028	0,021	0,010	0,007	0,549	0,308	0,201	0,066	120,7	7	2,20%	Complexo Três Córregos	Biotita Gnaiss, Biotita Granito	Neoproterozoico
1518240	PC0274P	2015	1	SALESOPOLIS	Poço Vila Bragança - Estrada do Serrote 920, Sabesp	-23,5317	-45,9592	37 a 49	6	1,221	0,067	0,082	0,122	0,010	0,017	0,744	0,731	0,153	0,061	161	7,3	5,28%	Costeiro, unidade de gnaisses peraluminosos	Gnaiss, Paragnaisse, Gnaiss aluminoso	Neoproterozóico
1501441	PC0278P	2015	1	SANTO ANTONIO DE POSSE	BEEF Snacks Ind. Com.	-22,6025	-47,0067	171 a 300	5	0,213	0,133	1,072	3,019	0,011	0,474	0,833	3,941	0,008	0,011	275	8,8	-1,32%	Itararé	Arenito, Diamictito, Folhelho, Ritmito	Carbonífero
1317849	PC0280P	2013	1	SAO LOURENCO DA SERRA	Poço do Despézio, Sabesp - Rua Antonio Despézio, nº8	-23,8078	-46,9258	-	11	0,814	0,067	0,106	0,294	0,011	0,053	0,664	0,709	0,170	0,080	145,4	7,05	9,36%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1409852	PC0282P	2014	1	SETE BARRAS	P2 - Sabesp - Ribeirão da Serra	-24,2889	-47,9461	29 a 222	11	1,350	0,000	0,091	0,208	0,011	0,026	0,619	0,526	0,445	0,056	166	7,59	-1,23%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1528805	PC0283P	2015	2	SILVEIRAS	P1 - Sabesp	-22,6758	-44,8583	12 a 140	2	0,656	0,000	0,028	0,021	0,011	0,007	0,432	0,334	0,112	0,070	100	6,4	13,5%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico

Pontos de coleta				Dados geográficos				Dados hidrogeológicos		Dados hidroquímicos (meq/L)													Dados geológicos		
Número da amostra	Código CESTESB	Ano	Campanha	Município	Descrição	Latitude	Longitude	Profundidade de captação (m)	UGRHI	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ₂ ⁺	Na ⁺	Mg ₂ ⁺	K ⁺	Condutividade e elétrica (µS/cm)	pH	e%	Unidade	Litologia	Era/Período
1329050	PC0290P	2013	2	PIRAPORA DO BOM JESUS	P4 Sabesp	-23,4092	-46,9808	136 a 211	6	2,163	0,067	0,046	0,055	0,011	0,053	2,146	0,089	0,644	0,011	265	7,64	9,37%	São Roque, Formação Estrada dos Romeiros	Metarenito Quartzoso, Metapelito, Metarrilito	Neoproterozóico
1518979	PC0295P	2015	1	CAJAMAR	P1 Sabesp - Distr. De Jordanésia Cond. Capitalville	-23,2903	-46,8689	24 a 215	6	0,402	0,067	0,065	0,021	0,013	0,005	0,189	0,108	0,221	0,031	58	6,15	-2,09%	São Roque, Formação Estrada dos Romeiros	Metarenito Quartzoso, Metapelito, Metarrilito	Neoproterozóico
1501426	PC0298P	2015	1	AMPARO	P2 PM Jardim Vitória	-22,6808	-46,7778	11 a 150	5	1,639	0,067	0,254	0,062	0,015	0,005	1,233	0,561	0,554	0,073	269	6,5	8,49%	Amparo, unidade de migmatitos tonalito-trondhjêmíticos	Trondhjemitó, Ortognaisse, Migmatito Estromático	Mesoarqueano
1518241	PC0299P	2015	1	SAO BERNARDO DO CAMPO	P2 - Sabesp Santa Cruz	-23,8383	-46,5897	34 a 240	6	0,896	0,067	0,140	0,123	0,015	0,011	0,368	0,500	0,391	0,056	124	6,73	2,42%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1518242	PC0300P	2015	1	SAO BERNARDO DO CAMPO	P1 - Sabesp Tatetos	-23,8242	-46,5639	85 a 220	6	0,923	0,067	0,146	0,077	0,016	0,016	0,414	0,539	0,299	0,061	126	6,87	2,63%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1329046	PC0301P	2013	2	SAO BERNARDO DO CAMPO	P1 - Sabesp Capelinha	-23,7850	-46,5022	51 a 208	6	1,191	0,067	0,079	0,106	0,016	0,053	0,793	0,557	0,358	0,064	159	6,97	7,91%	Embu, unidade paragnáissica	Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1507606	PC0318P	2015	2	GUAPIARA	P1 - Sabesp Elias	-24,2500	-48,5067	41 a 100	14	3,409	0,000	0,071	0,027	0,017	0,007	3,064	0,099	0,963	0,009	384	7,3	7,88%	Furnas Lageado, unidade terrígena	Filito, Metarenito, Metaconglomerado, Metapelito, Metassilito	Mesoproterozóico
1302077	PC0319P	2013	1	REGISTRO	P1 - Sabesp Serrote	-24,4056	-47,7481	22 a 28 e de 34,5 a 118	11	0,911	0,333	0,194	0,208	0,017	0,026	0,669	0,544	0,473	0,114	160	6,42	3,13%	Atuba, Gnaiss Itapeúna	Diorito, Gnaiss, Gnaiss Granítico, Biotita Monzogranito	Paleoproterozóico
1518989	PC0320P	2015	1	MAIRINQUE	P18 - Saneaqua Dona Catarina	-23,4236	-47,2228	17 a 21 e de 33 a 150	10	0,610	0,067	0,047	0,021	0,018	0,005	0,354	0,341	0,274	0,030	100	6,16	13,1%	São Roque, Formação Estrada dos Romeiros	Metarenito Quartzoso, Metapelito, Metarrilito	Neoproterozóico
1502053	PC0321P	2015	2	MONTE ALEGRE DO SUL	P Mostardas PM	-22,7239	-46,6311	10 a 107	5	1,229	0,067	0,085	0,146	0,020	0,005	1,038	0,363	0,285	0,071	176	7,1	6,23%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1425171	PC0322P	2014	2	CAMPOS DO JORDAO	P Associação dos Funcionários Públicos	-22,7244	-45,5686	15 a 43	1	0,328	0,000	0,045	0,021	0,021	0,005	0,169	0,130	0,103	0,040	47	6,3	2,61%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1429630	PC0323N	2014	2	SAO PAULO	Bica Horto Florestal	-23,4550	-46,6389	Nascente	6	0,406	0,067	0,028	0,021	0,027	0,005	0,238	0,165	0,111	0,050	50	6,71	0,86%	Granito Cantareira	Granodiorito, Monzogranito	Neoproterozóico
1512325	PC0328P	2015	2	ITAPIRA	P Barão de Ataliba - PM	-22,3886	-46,7456	12 a 230	5	1,590	0,067	0,333	0,044	0,046	0,008	1,532	0,492	0,897	0,057	291	7	17,6%	Amparo, unidade de migmatitos tonalito-trondhjêmíticos	Trondhjemitó, Ortognaisse, Migmatito Estromático	Mesoarqueano
1527571	PC0329P	2015	2	BARRA DO TURVO	Pedágio BR 116 Km 543	-24,9628	-48,4114	20 a 150	6	1,422	0,000	0,085	0,208	0,048	0,043	0,948	0,509	0,399	0,041	196	6,56	2,47%	Atuba, unidade de gnaisses bandados	Gnaiss, Gnaiss Granítico, Hornblenda Gnaiss, Biotita Gnaiss	Paleoproterozóico
1415474	PC0341P	2014	1	SAO LOURENCO DA SERRA	BR116 - Pedágio km 298	-23,7872	-46,9142	53 a 200	11	0,760	0,067	0,043	0,195	0,049	0,019	0,298	0,548	0,170	0,072	111	6,84	-2,11%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1528807	PC0343P	2015	2	PIQUETE	PM	-22,6189	-45,1656	20 a 150	2	1,983	0,000	0,170	0,279	0,063	0,005	1,851	0,299	0,831	0,160	347	7,5	11,4%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1528813	PC0344P	2015	2	IGARATA	EMEF Boa Vista	-23,1581	-46,2233	14 a 90	2	1,409	0,000	0,211	0,097	0,065	0,114	0,497	1,583	0,121	0,051	252	6,7	8,57%	Granito Serra da Boa Vista	Granodiorito, Monzonito, Biotita Granito	Neoproterozóico
1401387	PC0345P	2014	1	ITUPEVA	Rod. Dom Gabriel Paulino - Pedágio km 78	-23,2353	-47,0419	35 a 220	5	1,098	0,067	0,085	0,083	0,068	0,016	0,579	0,496	0,467	0,023	159	6,8	4,99%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1518245	PC0349P	2015	1	SAO PAULO	Sabesp - Jardim Oriental	-23,8706	-46,7678	40 a 250	6	0,623	0,067	0,067	0,188	0,076	0,009	0,395	0,358	0,188	0,064	109	6,49	-1,21%	Embu, unidade de xistos, localmente migmatíticos	Mica xisto, Quartzo Xisto	Neoproterozóico
1527569	PC0352P	2015	2	SETE BARRAS	P5 (antigo P3) - Sabesp - Ribeirão da Serra	-24,2778	-47,9489	39 a 180	11	1,093	0,000	0,085	0,208	0,110	0,026	0,382	0,535	0,569	0,044	147	6,34	0,26%	Depósitos aluvionares	Areia, Cascalho	Cenozóico
1506281	PC0357P	2015	1	MOCOCA	Sabesp P2 São Benedito das Areias	-21,3158	-47,0278	27 a 122	4	2,065	0,000	0,125	0,059	0,114	0,012	0,584	1,805	0,417	0,052	282	7,87	9,22%	Varginha-Guaxupé, unidade paragnáissica migmatítica superior	Paragnaisse, Mica xisto, Biotita Gnaiss	Neoproterozóico
1506260	PC0358P	2015	1	RIFAINA	Sabesp P6	-20,0900	-47,4283	35 a 150	8	1,737	0,000	0,051	0,021	0,000	0,005	1,572	0,234	0,308	0,119	204	7,15	10,3%	Canastra Indiviso	Filito, Metarenito, Mica xisto, Grafita xisto, Sericita Xisto	Mesoproterozóico

APÊNDICE A

Estatística das variáveis hidroquímicas

Unidade	Número de amostras	Estatística	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Condutividade elétrica (µS/cm)	pH
Gnaisse	18	Mínimo	0,033	0,000	0,020	0,010	0,001	0,005	0,052	0,130	0,100	0,018	39,30	5,00
		Máximo	2,065	0,067	0,333	0,279	0,114	0,054	1,851	1,805	0,897	0,160	347,00	8,10
		Média	1,291	0,044	0,116	0,094	0,025	0,018	0,882	0,537	0,429	0,062	192,61	6,90
		Desvio padrão	0,532	0,031	0,077	0,073	0,030	0,018	0,474	0,369	0,247	0,029	79,80	0,68
Granitoide	11	Mínimo	0,038	0,000	0,028	0,021	0,002	0,005	0,025	0,114	0,023	0,021	18,00	6,00
		Máximo	3,048	0,067	0,421	0,315	0,065	0,114	2,146	1,583	1,457	0,097	387,00	7,55
		Média	1,387	0,042	0,111	0,086	0,012	0,025	0,849	0,582	0,355	0,055	187,99	6,82
		Desvio padrão	0,794	0,032	0,116	0,086	0,018	0,033	0,588	0,445	0,391	0,023	108,83	0,45
Mica xisto	12	Mínimo	0,155	0,000	0,028	0,021	0,003	0,005	0,054	0,114	0,042	0,038	34,00	5,52
		Máximo	1,524	0,333	0,276	0,294	0,076	0,053	0,803	1,353	0,445	0,092	220,00	8,55
		Média	0,819	0,078	0,111	0,151	0,018	0,021	0,447	0,539	0,217	0,062	132,95	6,95
		Desvio padrão	0,399	0,081	0,072	0,079	0,021	0,017	0,194	0,304	0,123	0,015	52,01	0,72
Metarenito	5	Mínimo	0,297	0,067	0,028	0,021	0,003	0,005	0,189	0,089	0,091	0,011	58,00	6,15
		Máximo	2,163	0,067	0,454	0,090	0,018	0,053	2,146	0,657	0,810	0,031	325,00	7,64
		Média	1,094	0,067	0,128	0,046	0,011	0,015	0,951	0,269	0,408	0,023	196,00	6,76
		Desvio padrão	0,814	0,000	0,164	0,026	0,005	0,019	0,847	0,214	0,272	0,007	100,95	0,59
Suíte alcalina	3	Mínimo	0,656	0,000	0,045	0,144	0,003	0,016	0,494	0,113	0,378	0,042	100,00	6,42
		Máximo	1,386	0,333	0,216	0,208	0,017	0,026	0,669	0,661	0,584	0,114	193,00	6,92
		Média	0,984	0,133	0,152	0,187	0,008	0,023	0,599	0,439	0,478	0,078	151,00	6,65
		Desvio padrão	0,303	0,144	0,076	0,030	0,006	0,005	0,075	0,236	0,084	0,029	38,50	0,21
Mármore	1	Mínimo	2,278	0,000	0,174	0,024	0,003	0,013	1,866	0,124	1,086	0,077	321,00	7,40
		Máximo	2,278	0,000	0,174	0,024	0,003	0,013	1,866	0,124	1,086	0,077	321,00	7,40
		Média	2,278	0,000	0,174	0,024	0,003	0,013	1,866	0,124	1,086	0,077	321,00	7,40
		Desvio padrão	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Migmatito	2	Mínimo	0,257	0,067	0,028	0,042	0,003	0,005	0,200	0,131	0,080	0,021	45,00	7,04
		Máximo	1,393	0,067	0,035	0,250	0,007	0,011	1,183	0,552	0,081	0,059	220,00	7,60
		Média	0,825	0,067	0,032	0,146	0,005	0,008	0,691	0,342	0,081	0,040	132,50	7,32
		Desvio padrão	0,568	0,000	0,004	0,104	0,002	0,003	0,492	0,211	0,001	0,019	87,50	0,28
Filito	7	Mínimo	0,246	0,000	0,051	0,021	0,000	0,005	0,117	0,099	0,070	0,009	51,00	5,50
		Máximo	3,409	0,067	0,133	0,722	0,017	0,071	3,064	1,196	0,963	0,119	384,00	7,80
		Média	1,457	0,048	0,091	0,153	0,004	0,028	1,108	0,412	0,421	0,044	201,39	6,79
		Desvio padrão	1,027	0,030	0,026	0,238	0,005	0,025	0,950	0,382	0,326	0,033	111,74	0,72
Indistinto	6	Mínimo	0,213	0,000	0,028	0,036	0,003	0,008	0,126	0,461	0,008	0,011	131,60	6,34
		Máximo	1,999	0,333	1,072	3,019	0,110	0,474	0,833	3,941	1,193	0,207	302,00	9,03
		Média	1,150	0,100	0,324	0,662	0,022	0,117	0,391	1,655	0,333	0,074	203,43	7,83
		Desvio padrão	0,571	0,114	0,356	1,057	0,039	0,164	0,233	1,322	0,430	0,064	63,33	1,01
SAC	65	Mínimo	0,033	0,000	0,020	0,010	0,000	0,005	0,025	0,089	0,008	0,009	18,00	5,00
		Máximo	3,409	0,333	1,072	3,019	0,114	0,474	3,064	3,941	1,457	0,207	387,00	9,03
		Média	1,197	0,062	0,132	0,163	0,016	0,030	0,777	0,597	0,368	0,057	181,22	6,97
		Desvio padrão	0,701	0,067	0,152	0,374	0,024	0,061	0,604	0,630	0,311	0,033	89,81	0,73

Obs.: Valores de concentração de íons em meq/L

APÊNDICE B

Razões iônicas

UNIDADE	MUNICÍPIO	$\frac{rNa^+}{Ca^{2+}}$	$\frac{rK^+}{Na^+}$	$\frac{rMg^{2+}}{Ca^{2+}}$
GNAISSE	ITAPIRA	0.318	0.098	0.546
	JAMBEIRO	0.258	0.447	0.903
	VALINHOS	0.774	0.160	0.813
	LINDOIA	0.477	0.102	0.289
	RIO GRANDE DA SERRA	2.577	0.134	1.923
	BIRITIBA-MIRIM	0.967	0.089	0.281
	MONTEIRO LOBATO	0.975	0.074	0.529
	RIBEIRAO BRANCO	0.561	0.214	0.366
	SALESOPOLIS	0.983	0.083	0.206
	AMPARO	0.455	0.130	0.449
	SAO BERNARDO DO CAMPO	0.702	0.115	0.451
	MONTE ALEGRE DO SUL	0.350	0.196	0.275
	CAMPOS DO JORDAO	0.769	0.308	0.609
	ITAPIRA	0.321	0.116	0.586
	BARRA DO TURVO	0.537	0.081	0.421
	PIQUETE	0.162	0.535	0.449
	ITUPEVA	0.857	0.046	0.807
	MOCOCA	3.091	0.029	0.714
GRANITOIDE	PEDRA BELA	0.368	0.362	0.251
	SAO ROQUE	3.330	0.196	0.768
	SAO ROQUE	0.469	0.087	0.348
	EMBU	1.192	0.043	0.233
	SANTO ANDRE	4.560	0.193	0.920
	BANANAL	0.679	0.114	0.489
	CAPAO BONITO	0.100	0.098	0.679
	ITAPIRAPUA PAULISTA	0.380	0.117	0.499
	NAZARE PAULISTA	0.622	0.071	0.137
	SAO PAULO	0.693	0.303	0.466
	IGARATA	3.185	0.032	0.243
FILITO	PIEDADE	0.288	0.272	1.346
	PIEDADE	0.581	0.044	0.340
	SAO MIGUEL ARCANJO	1.615	0.116	1.299
	COTIA	1.289	0.038	0.075
	EMBU-GUACU	1.713	0.153	1.336
	GUAPIARA	0.032	0.091	0.314
	RIFAINA	0.149	0.509	0.196
MIGMATITO	TUIUTI	0.467	0.107	0.068
	JOANOPOLIS	0.655	0.160	0.400
MICA XISTO	ITAPECERICA DA SERRA	2.111	0.333	1.630
	POA	1.007	0.056	0.052
	EMBU	1.194	0.156	0.459
	SAO PAULO	0.778	0.166	0.511
	MIRACATU	2.337	0.068	0.589
	SAO LOURENCO DA SERRA	1.068	0.113	0.256
	SETE BARRAS	0.850	0.106	0.719
	SILVEIRAS	0.773	0.210	0.259
	SAO BERNARDO DO CAMPO	1.359	0.112	1.063
	SAO BERNARDO DO CAMPO	1.302	0.113	0.722
	SAO LOURENCO DA SERRA	1.839	0.131	0.570
SAO PAULO	0.906	0.179	0.476	
METARENITO	CAJAMAR	0.363	0.032	0.447
	MAIRIPORA	0.594	0.139	0.358
	PIRAPORA DO BOM JESUS	0.041	0.124	0.300
	CAJAMAR	0.571	0.287	1.169
	MAIRINQUE	0.963	0.088	0.774
SUÍTE ALCALINA	AGUAS DA PRATA	0.229	0.690	0.765
	ELDORADO	1.043	0.064	0.921
	REGISTRO	0.813	0.210	0.707
MÁRMORE	APIAI	0.066	0.621	0.582
INDISTINTO	SAO PAULO	9.530	0.011	0.027
	MOJI DAS CRUZES	8.139	0.039	0.443
	SAO PAULO	0.906	0.189	0.261
	CAJATI	4.556	0.361	9.468
	SANTO ANTONIO DE POSSE	4.731	0.003	0.010
	SETE BARRAS	1.401	0.082	1.490