



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA ESPECIAÇÃO QUÍMICA DO SULFATO NAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DA BAHIA E CORRELAÇÃO COM A
GEOLOGIA E PLUVIOSIDADE

Maiana Azevedo Vasconcelos

Salvador,
2018

Maiana Azevedo Vasconcelos

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA ESPECIAÇÃO QUÍMICA DO SULFATO NAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DA BAHIA E CORRELAÇÃO COM A
GEOLOGIA E PLUVIOSIDADE

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade Federal da Bahia como
requisito para a obtenção do título de Mestre
em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Iara Brandão de
Oliveira

Salvador,
2018

V331

Vasconcelos, Maiana Azevedo

Avaliação preliminar da especiação química do sulfato nas águas subterrâneas do Estado da Bahia e correlação com a geologia e pluviosidade / Maiana Azevedo Vasconcelos. - - Salvador, 2018.

170 f. : il

Orientadora: Iara Brandão de Oliveira.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) - - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2018.

1 Águas subterrâneas.. 2. Sulfato. 3 Especiação química I. de Oliveira, Iara Brandão. II Título.

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do autor: Maiana Azevedo Vasconcelos

Assinatura do autor: _____

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 – 4º andar, Federação – Salvador – BA

CEP: 40210-630

e-mail: maiana_mayazevedo@hotmail.com



MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITECNICA



MAIANA AZEVEDO VASCONCELOS

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA ESPECIAÇÃO QUÍMICA DO SULFATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DA BAHIA E CORRELAÇÃO COM A GEOLOGIA E PLUVIOSIDADE

Dissertação apresentada ao Mestrado em Meio Ambiente, Águas
e Saneamento como requisito parcial para obtenção do título de
MESTRE EM MEIO AMBIENTE, ÁGUAS E SANEAMENTO.

Banca Examinadora:

Profa. Dr^a. Iara Brandão de Oliveira *Iara Brandão de Oliveira*
Universidade Federal da Bahia – UFBA (Orientadora)

Profa. Dr^a. Vânia Campos Palmeira *Vânia P. Campos*
Universidade Federal da Bahia – UFBA (Membro Interno)

Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz *Luciano Matos Queiroz*
Universidade Federal da Bahia – UFBA (Membro Interno)

Prof. Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento *Sérgio Augusto de Moraes Nascimento*
Universidade Federal da Bahia – UFBA (Membro Externo)

Salvador
26 de janeiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela vida, pela saúde e disposição, por me proporcionar a oportunidade de estudar, e aprimorar conhecimentos, por ter colocado pessoas tão especiais ao meu lado, sem as quais certamente não teria dado conta!

A minha mãe, Telma, pelo apoio e amor incondicionais, por sempre acreditar que tudo é possível e que eu sou capaz, mesmo quando nem eu mesma acreditava, e que me fez dar sempre o melhor de mim, por ter me aturado nos momentos difíceis e nas fases de maior concentração e estresse, mas que no fim deu tudo certo! Amo você! Agradeço também a meu pai, Roberto!

A minha avó, Bernadete, que sempre acredita na minha capacidade, e com sábias palavras soube dar o apoio e incentivo nas horas necessárias, além das orações a meu favor! Amo muito!

À Profª. Iara que acreditou no meu potencial e me incentivou no desenvolvimento do trabalho, sempre disponível e disposta a ajudar, e esclarecer dúvidas!

Aos professores do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA, em especial à profª Márcia Marinho, Luciano Matos, Patrícia Borja, Yvonilde Medeiros, Adriana Ferreira, pelo apoio e incentivo!

Agradeço também ao profº Sérgio Nascimento e à profª Vânia Campos, que fizeram parte da banca examinadora, por estarem sempre solícitos e prestativos!

Aos amigos do mestrado, em especial Patrícia, Alessandro, Jossy, Jonatas, Tarssio, Adriana, por dividir momentos de felicidade e angústia, e muitos sorrisos e almoços, tornando mais leve toda essa trajetória de trabalho. Foi bom demais contar com vocês!

Aos alunos da disciplina Qualidade da Água - 2017.1, em que realizei o Estágio em Docência, pela atenção, compreensão e carinho! Bem como a todos os funcionários do Departamento de Engenharia Ambiental da Poli – UFBA, muito obrigada!

A José Carlos e todos os profissionais da CERB que se mostraram dispostos a me ajudar durante o mestrado.

Agradeço também à CAPES pelo apoio financeiro!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”. (Madre Teresa de Calcuta)

RESUMO

Segundo análises, é verificada significativa presença de sulfato na água subterrânea do estado da Bahia. Os sulfatos podem alterar o sabor das águas, provocando rejeição por parte do consumidor, e, além disso, possuem efeito laxativo sobre os seres humanos. Este trabalho tem como objetivo estudar, de forma preliminar, a especiação química do sulfato nas águas subterrâneas do estado da Bahia, fazendo uma correlação entre sua distribuição, a geologia e a pluviosidade. Foram avaliadas as concentrações de sulfato nas águas subterrâneas de poços localizados no estado da Bahia, perfurados no período de 2003 a 2013, tomando como base o limite de 250 mg L⁻¹ estabelecido pela Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde. A seguir, as águas foram classificadas segundo o diagrama triangular de PIPER, quanto às características hidroquímicas, e, posteriormente, foram determinadas as formas químicas associadas ao sulfato que ocorrem nas águas subterrâneas, através da aplicação do método *Tableau*, com o software MINEQL +, estabelecendo uma correlação com a geologia e pluviosidade. Dentre as 2.792 amostras de águas subterrâneas estudadas, 10% dessas águas (289 amostras) apresentou teores de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹. A maioria dos 2.792 poços se localiza no domínio cristalino (50,14%), sendo também o domínio que apresenta o maior percentual de poços com teores de sulfato acima do limite (15%), enquanto que o domínio sedimentar é o que menos contribuiu com poços com teores elevados de sulfato (somente 1%). A concentração de sulfato para as 2.792 amostras variou no intervalo de 0 a 3.026 mg L⁻¹. As características hidroquímicas das 2.792 amostras de água subterrânea, estudadas através dos diagramas de Piper, indicaram um predomínio de águas cloretadas mistas, cloretadas cálcicas, bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Os resultados da aplicação do método *Tableau*, por meio do software MINEQL +, para obtenção das espécies químicas do sulfato e suas concentrações, nas 289 amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹, indicaram maiores concentrações de CaSO₄ (aq) e MgSO₄ (aq) nas águas, seguido de concentrações menores para NaSO₄⁻ e concentrações bem pequenas de KSO₄⁻. Observou-se que a pluviosidade não foi tão influente na concentração e no tipo de espécie química do sulfato encontrado em cada amostra, sendo a geologia a maior influência sobre a composição química dessas águas.

Palavras-chave: água subterrânea, sulfato, especiação química

ABSTRACT

According to analyzes, a significant presence of sulfate in the groundwater of the State of Bahia is verified. Sulfates can alter the taste of water, leading to consumer rejection, and have a laxative effect on humans. This work aims to study, in a preliminary way, the chemical speciation of sulfate in the groundwater of the State of Bahia, making a correlation between its distribution, geology and rainfall. Sulphate concentrations in the groundwater of wells located in the State of Bahia, drilled from 2003 to 2013, based on the limit of 250 mg L^{-1} established by Portaria n°. 2914/2011 of the Ministry of Health were evaluated. Then, the water was classified according to the triangular diagram of PIPER, with respect to the hydrochemical characteristics, and subsequently, the chemical forms associated to the sulfate that occur in the groundwater were determined by applying the Tableau method with the MINEQL + software, establishing a correlation with geology and rainfall. Among the 2792 groundwater samples studied, 10% of these waters (289 samples) had sulfate levels above the limit of 250 mg L^{-1} . Most of the 2792 wells are located in the crystalline domain (50,14%), and the domain presents the highest percentage of wells with sulfate content above the limit (15%), while the sedimentary domain is the one that contributed least to wells with high sulfate content (only 1%). The sulfate concentration for the 2792 samples ranged from 0 to 3026 mg L^{-1} . The hydrochemical characteristics of the 2792 groundwater samples, studied through the Piper diagrams, indicated a predominance of waters mixed chlorinated, calcium chlorinated, calcium bicarbonate and sodium bicarbonate. The results of the application of the Tableau method, using the MINEQL + software to obtain the sulfate chemical species and their concentrations, in the 289 groundwater samples with sulfate levels above 250 mg L^{-1} indicated higher concentrations of $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ and $\text{MgSO}_{4(\text{aq})}$ in the water, followed by lower concentrations for NaSO_4^- and very small concentrations of KSO_4^- . It was observed that rainfall was not as influential in the concentration and type of the chemical sulfate species found in each sample, with geology having the greatest influence on the chemical composition of these waters.

Key words: groundwater, sulfate, chemical speciation

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CERB -	Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento do Estado da Bahia
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM -	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAR -	Drenagem Ácida de Rocha
DSG -	Diretoria do Serviço Geográfico do Exército
ESRI –	Instituto de Pesquisa em Sistemas Ambientais (do inglês: Environmental Systems Research Institute)
FUNCEME -	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE -	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE -	Infraestrutura Nacional de Dados de Satélite
INPE -	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MS –	Ministério da Saúde
OD -	Oxigênio Dissolvido
OMS -	Organização Mundial de Saúde
PLANASA -	Plano Nacional de Saneamento
SIAGAS -	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG -	Sistema de Informações Geográficas
SUDENE -	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UFBA –	Universidade Federal da Bahia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O ciclo hidrogeoquímico	24
Figura 2 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos do método Tableau	33
Figura 3 – Gráfico de dispersão referente à relação entre ferro e sulfato nos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia	37
Figura 4 – Matriz de correlação linear de Pearson	39
Figura 5 – Matriz de correlação de Spearman	40
Figura 6 – Mapa dos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia.	43
Figura 7 – Mapa dos tipos de climas do estado da Bahia	46
Figura 8 – Mapa de geodiversidade do estado da Bahia	51
Figura 9 – Imagem da planilha eletrônica com dados de análises físico-químicas e químicas das águas subterrâneas do estado da Bahia.	53
Figura 10 – Foto da interface do software Qualigraf®	56
Figura 11 – Diagrama triangular de PIPER e a classificação das águas quanto aos íons dominantes	57
Figura 12 – Interface inicial do software Mineql +®	58
Figura 13 – Interface do Tableau no software Mineql +®	59
Figura 14 – Módulo de espécies do Tableau exibido no software Mineql +®	60
Figura 15 – Interface da saída da especiação em formato tabular no software Mineql +®	60
Figura 16 – Interface da saída da especiação em formato de gráfico de barras horizontal realizada no software Mineql +®	60
Figura 17 – Interface da saída da especiação em formato de relatório realizada no software Mineql +®	61
Figura 18 – Mapa de localização dos 2.792 poços no estado da Bahia.	63
Figura 19 – Mapa de localização dos 289 poços com teores de sulfato acima de 250 mg L ⁻¹ , por domínio hidrogeológico do estado da Bahia.	64
Figura 20 – Gráficos de dispersão entre o sulfato e os parâmetros físicos e químicos, para o universo das 2.792 amostras estudadas	70
Figura 21 – Mapa de localização dos 1.400 poços do domínio das rochas cristalinas.	76
Figura 22 – Mapa de localização dos 499 poços no cristalino centro - norte	78
Figura 23 – Diagrama de Piper com os 499 poços localizados no compartimento cristalino centro - norte	79
Figura 24 – Mapa de localização dos 402 poços no cristalino centro - sul	80
Figura 25 – Diagrama de Piper com os 402 poços localizados no compartimento cristalino centro - sul	81

Figura 26 – Mapa de localização dos 499 poços no cristalino centro - sudeste.....	82
Figura 27 – Diagrama de Piper com os 499 poços localizados no compartimento cristalino sudeste.....	83
Figura 28 – Mapa de localização dos 404 poços no domínio das rochas calcárias. .	84
Figura 29 – Mapa de localização dos 262 poços no compartimento calcário Irecê...	86
Figura 30 – Diagrama de Piper com os 262 poços localizados no compartimento calcário Irecê	87
Figura 31 – Mapa de localização dos 142 poços no compartimento calcário oeste..	88
Figura 32 – Diagrama de Piper com os 142 poços localizados no compartimento calcário oeste	89
Figura 33 – Mapa de localização dos 638 poços no domínio metassedimentar.	90
Figura 34 – Mapa de localização dos 356 poços no compartimento metassedimentar leste.....	92
Figura 35 – Diagrama de Piper com os 356 poços localizados no compartimento metassedimentar leste	93
Figura 36 – Mapa de localização dos 282 poços no compartimento metassedimentar oeste	94
Figura 37 – Diagrama de Piper com os 282 poços localizados no compartimento metassedimentar oeste	95
Figura 38 – Mapa de localização dos 350 poços no domínio das rochas sedimentares.....	96
Figura 39 – Mapa de localização dos 82 poços no compartimento sedimentar Tucano	98
Figura 40 – Diagrama de Piper com os 82 poços localizados no compartimento sedimentar Tucano.....	99
Figura 41 – Mapa de localização dos 124 poços no compartimento sedimentar Recôncavo - Camamu.....	100
Figura 42 – Diagrama de Piper com os 124 poços localizados no compartimento sedimentar Recôncavo - Camamu.....	101
Figura 43 – Mapa de localização dos 83 poços no compartimento sedimentar Litoral Sul	102
Figura 44 – Diagrama de Piper com os 83 poços localizados no compartimento sedimentar Litoral Sul.....	103
Figura 45 – Mapa de localização dos 61 poços no compartimento sedimentar Urucuia.....	104
Figura 46 – Diagrama de Piper com os 61 poços localizados no compartimento sedimentar Urucuia	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos constituintes inorgânicos dissolvidos na água subterrânea	26
Quadro 2 – Mobilidade das substâncias	27
Quadro 3 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos e fórmulas estequiométricas das espécies em função dos componentes	33
Quadro 4 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos e equações de balanço de mols	34
Quadro 5 - Espécies químicas de sulfato com suas fórmulas	35
Quadro 6 – Unidades geológico - ambientais do território brasileiro	47
Quadro 7 - Matriz de correlação linear de Pearson para o universo das 2.792 amostras de água subterrânea.....	73
Quadro 8 - Matriz de correlação de Spearman para o universo das 2.792 amostras de água subterrânea	74
Quadro 9 – Resumo das características hidroquímicas, obtidas utilizando o diagrama de PIPER, por compartimento em cada domínio hidrogeológico	106
Quadro 10 – Especificação química do sulfato do domínio sedimentar.....	110
Quadro 11 – Especificação química do sulfato do domínio calcário Irecê	112
Quadro 12 – Especificação química do sulfato do domínio cristalino sudeste.....	113
Quadro 13 – Especificação química do sulfato do domínio cristalino sul.....	114
Quadro 14 – Especificação química do sulfato do domínio cristalino norte	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poços perfurados pela CERB de 2003 a 2013, por domínio hidrogeológico e por teor de sulfato	65
Tabela 2 – Estatística descritiva para as 2.792 amostras de água subterrânea	67
Tabela 3 - Distribuição dos teores de sulfato, por intervalo de classes, das 2.792 amostras.....	68
Tabela 4 – Distribuição dos teores de sulfato, por intervalo de classes de concentração, das 289 amostras enriquecidas em sulfato.....	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral.....	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1. Utilização dos Recursos Hídricos Subterrâneos	20
3.2. Qualidade da Água Subterrânea	23
3.2.1 Parâmetros Físicos e Químicos de Interesse em Águas Subterrâneas	24
3.2.2 Fatores Influentes na Qualidade das Águas Subterrâneas	28
3.3. Sulfato em Águas.....	29
3.3.1. Especiação Química do Sulfato em Águas	32
3.3.1.1. Estudos de Correlação entre Sulfato e outros parâmetros da qualidade da água	36
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.1. Domínios Hidrogeológicos do Estado da Bahia	42
4.1.1. Domínio das rochas cristalinas	43
4.1.2. Domínio das rochas metassedimentares.....	44
4.1.3. Domínio das rochas calcárias.....	44
4.1.4. Domínio das rochas sedimentares.....	44
4.2. Pluviosidade no Estado da Bahia	45
4.3. Geologia no Estado da Bahia	47
5. MATERIAIS E MÉTODOS	52
5.1. Materiais.....	52
5.2. Metodologia do trabalho	54
5.2.1. Revisão bibliográfica	54
5.2.2. Levantamento e tratamento do material a ser analisado	54
5.2.3. Tratamento estatístico dos dados	55
5.2.4. Estudo da caracterização química das águas subterrâneas do estado da Bahia.....	56
5.2.5. Utilização do método Tableau para especiação do sulfato	58
5.2.6. Confeção de mapas	61
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1. Localização dos 2.792 poços no estado da Bahia.....	63
6.2. Distribuição dos Teores de Sulfato nas Águas Subterrâneas do Estado da Bahia	65
6.3. Tratamento Estatístico dos Dados.....	66

6.3.1. Estatística Descritiva	66
6.3.2. Análise Bivariada.....	69
6.4. Classificação da Água Subterrânea segundo o Diagrama de PIPER	75
6.4.1. Domínio das Rochas Cristalinas	76
6.4.2. Domínio das Rochas Calcárias.....	84
6.4.3. Domínio das Rochas Metassedimentares.....	90
6.4.4. Domínio das Rochas Sedimentares.....	96
6.5. Especificação Química do Sulfato nas Águas Subterrâneas por meio da Aplicação do Método <i>Tableau</i>	107
6.5.1. Domínio das Rochas Sedimentares.....	109
6.5.2. Domínio das Rochas Metassedimentares.....	110
6.5.3. Domínio das Rochas Calcárias.....	111
6.5.4. Domínio das Rochas Cristalinas	113
7. CONCLUSÕES.....	123
8. REFERÊNCIAS	125
9. ANEXO	131
10. APÊNDICE.....	133
APÊNDICE A	134
APÊNDICE B	135
APÊNDICE C	136
APÊNDICE D.....	138
APÊNDICE E	148
APÊNDICE F.....	167

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, é crescente a preocupação de toda a sociedade com a disponibilidade e qualidade da água, pois em muitos lugares já há indícios da sua escassez, por mais abundante que este recurso pareça ser.

A água que se infiltra e se torna subterrânea possui uma dinâmica própria e, de acordo com o tipo de aquífero, pode sofrer constante recarga (como de chuvas e corpos de água), bem como interferência direta e indireta das ações do homem. A hidrogeologia é a ciência que estuda as leis que governam o movimento das águas subterrâneas, as interações mecânicas, físicas e químicas dessa água com o sólido poroso, e o transporte de energia, constituintes químicos e a matéria particulada pelo fluxo.

Devido à sua estrutura molecular dipolar a água é um excelente solvente (considerada solvente universal), e por esse motivo, as características químicas das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, sendo influenciadas pela sua interação com as rochas na qual o aquífero está inserido, bem como pelo tempo decorrido entre a entrada e a saída da água no sistema e pela ação climática. As águas de precipitação podem promover a concentração ou a diluição dos constituintes iônicos das águas subterrâneas. Além disso, as águas meteóricas podem ser importantes fontes de espécies químicas dissolvidas tais como cloreto, sulfato e sódio, entre outros. Desta forma, a qualidade da água subterrânea poderá ser alterada não apenas por ação antrópica, como também pela evolução do processo de intemperismo.

O aumento do consumo da água subterrânea no processo de desenvolvimento social e econômico tem exigido o controle sistemático da sua qualidade. A água subterrânea tem usos múltiplos para abastecimento doméstico, irrigação, dessedentação de animais, recreação e fins industriais. A combinação desses fatores com o esgotamento das reservas de água potável e as doenças de origem hídrica, conduz a um aumento na procura de água de boa qualidade, e poderá ser um dos principais problemas socioambientais.

No Brasil, a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde define como água potável, aquela água destinada ao consumo humano, que atenda aos padrões de potabilidade estabelecidos nessa Portaria e que não ofereça riscos à saúde. Para regulamentação

da qualidade das águas subterrâneas, existe também a Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Essas legislações estabelecem valores máximos permitidos para parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos com vistas a atender aos padrões de potabilidade.

Saúde humana e consumo de água estão intimamente relacionados, pois sem água adequada e saudável, não existe saúde pessoal e saúde do planeta. A incidência de moléstias em homens e animais tem mostrado relação com abundância ou deficiência de elementos em concentrações maiores ou menores no meio ambiente, particularmente nas águas. A contaminação dos aquíferos pode se constituir em um grave problema de saúde pública, com sérios riscos e efeitos adversos na população quando estes mananciais são utilizados para consumo doméstico direto.

No estado da Bahia, grande parte da população rural depende necessariamente das águas subterrâneas para consumo humano, dessedentação animal e irrigação, devido à pluviosidade irregular e à carência de mananciais superficiais, principalmente na região classificada como de clima semiárido.

O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas é importante, pois busca ter uma compreensão da qualidade natural da água, a avaliação de risco de contaminação e a aferição da efetividade das medidas de proteção da qualidade dessas águas.

A Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento do Estado da Bahia (CERB), empresa estatal fundada em 1971, é o principal órgão de fomento à perfuração de poços e distribuição de água dos mananciais subterrâneos. Possui um enorme acervo de dados sobre a qualidade e quantidade dos recursos hídricos do estado da Bahia.

Os dados de análises físico-químicas, referentes à qualidade da água coletada no momento da perfuração dos poços, são armazenados em planilhas eletrônicas, porém a CERB não realiza um estudo/tratamento analítico desses dados. Nesse sentido, ressalta-se a importância desse trabalho, visto que realiza um tratamento dos dados de qualidade da água dos poços perfurados no estado da Bahia, no intuito de gerar informações úteis para a CERB, auxiliando em um melhor controle sobre possíveis locais para futuras perfurações de novos poços e o seu uso pela população.

Segundo análises, é verificada significativa presença de sulfato na água subterrânea do estado da Bahia. Assim sendo, um estudo sobre a presença de sulfato na água subterrânea, que muitas vezes é utilizada diretamente para abastecimento humano, possibilitará uma correlação entre a sua distribuição e os fatores físicos e ambientais.

O sulfato é um ânion muito comum na natureza, estando presente em águas naturais em concentrações muito variáveis. Surge nas águas subterrâneas através da dissolução de solos e rochas, como o gesso (CaSO_4) e o sulfato de magnésio (MgSO_4) e pela oxidação de sulfetos (como por exemplo, o sulfeto de ferro). O sulfato tende a estar mais presente em aquíferos que apresentam sulfetos na sua composição mineralógica. Entre outras formas químicas desta espécie nas águas subterrâneas pode-se citar: BaSO_4 , Na_2SO_4 , SrSO_4 e K_2SO_4 .

Os sulfatos podem alterar o sabor das águas, provocando rejeição por parte do consumidor, e, além disso, possuem efeito laxativo sobre os seres humanos. Em relação a esse efeito laxativo nos seres humanos, o sulfato de magnésio possui mais efeito do que o sulfato de sódio, por exemplo.

Diante disso, justifica-se o estudo da especiação química do sulfato nas águas subterrâneas, a fim de identificar qual o tipo de sulfato que pode estar predominando naquela água, visto que se pode associar os diferentes tipos de sulfato com efeitos para a saúde humana em diferentes graus.

Portanto, a partir do conhecimento da dinâmica do sulfato nas águas subterrâneas será possível sugerir procedimentos para o gerenciamento dos recursos hídricos. A melhoria do grau de conhecimento hidrogeoquímico e hidrogeológico dos aquíferos da região possibilitará o planejamento adequado para futuras perfurações de poços para obtenção de água subterrânea, minimizando os riscos e gastos, evitando locais em que seja conhecido por apresentarem teores elevados de sulfato.

Este trabalho tem como foco responder ao seguinte questionamento: quais são as formas químicas associadas ao sulfato que ocorrem nas águas subterrâneas do estado da Bahia? E qual a relação dessas formas químicas com a geologia e pluviosidade?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é avaliar, de forma preliminar, a especiação química do sulfato nas águas subterrâneas do estado da Bahia, fazendo uma correlação entre sua distribuição, a geologia e a pluviosidade, visando mapeamento de áreas críticas.

2.2. Objetivos Específicos

1. Avaliar as concentrações de sulfato presentes nas águas subterrâneas de poços localizados no estado da Bahia, tomando como base o limite estabelecido pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde e pela Resolução nº 396/2008 do CONAMA, que estabelecem 250 mg L⁻¹ como limite;
2. Classificar as águas subterrâneas do estado da Bahia segundo o diagrama triangular de PIPER, quanto às características hidroquímicas;
3. Estudar as formas químicas associadas ao sulfato que ocorrem nas águas subterrâneas do estado da Bahia;
4. Estabelecer uma correlação entre a distribuição dos teores de sulfato com a geologia e a pluviosidade;

3. REVISÃO DE LITERATURA

Alguns trabalhos foram desenvolvidos sobre a ocorrência de sulfato nas águas subterrâneas, sendo que, a maioria enfatiza as técnicas isotópicas aplicadas para a determinação da origem do sulfato nas águas, como os trabalhos de Fisher & Mullican (1997), Horst *et. al.* (2011), Bertrand *et. al.* (2016), entre outros. Faltam, na literatura, pesquisas que relacionem a presença de sulfato a fatores influentes em sua concentração nas águas subterrâneas e quais as formas químicas desta espécie.

Neste capítulo são apresentados conceitos relativos à água subterrânea, um pouco da história sobre a exploração da água subterrânea, fatores influentes na qualidade química dessas águas, formas de ocorrência do sulfato em águas subterrâneas e formas químicas desta espécie.

3.1. Utilização dos Recursos Hídricos Subterrâneos

A água subterrânea corresponde a toda água que ocorre no subsolo terrestre e, consiste num componente do ciclo hidrológico que depende da interação da precipitação com a infiltração e a evaporação. A ocorrência da água subterrânea, resultado da relação dos processos do ciclo hidrológico, se dá em formações geológicas denominadas aquíferos (RIBEIRO *et. al.*, 2010).

As condições de ocorrência das águas subterrâneas numa região são muito distintas, pois sofrem a influência de vários fatores, incluindo a recarga, geologia e pluviosidade, entre outros. Esses fatores possuem uma variabilidade muito grande e tal influência condiciona as formas de recarga (fluvial, pluvial, glacial etc.), o ambiente de origem, os lugares por onde percolam e/ou são armazenadas, circulação e descarga, as quais interferem na qualidade das águas subterrâneas.

A água subterrânea é aproveitada pelo homem desde a idade antiga, muito antes da compreensão da sua origem, ocorrência e movimento. Por isso, a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo.

A exploração de água subterrânea no Brasil se intensificou nas últimas décadas, em virtude do aumento da demanda por água de boa qualidade, e pelo fato das águas superficiais não estarem em condições de suprir as necessidades com a quantidade e qualidade exigidas.

A escolha do tipo de obra para captação de água subterrânea depende da potencialidade e tipo do aquífero, da demanda da água e da qualidade adequada ao fim a que se destina. Os poços tubulares dos tipos rasos e profundos são os mais comuns para captar água subterrânea.

Diversos usos têm ocasionado a exploração das águas subterrâneas, tais como: abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação, agricultura, pecuária, uso industrial, etc.

Por ocorrer em subsuperfície, a água subterrânea encontra-se menos vulnerável às contaminações do que a água superficial. Essa condição de proteção lhe confere importante papel no abastecimento humano e a coloca como reserva estratégica para as mais diversas finalidades de uso (CARMO, 2016).

Diante disso, a exploração das águas subterrâneas tornou-se uma opção bastante atraente para abastecimento público, pois atualmente, devido à escassez dos recursos hídricos superficiais, ocorre em maiores quantidades que as águas superficiais, sendo em geral de boa qualidade.

Com a instituição, no ano de 1969, do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), a perfuração de poços tubulares teve um aumento significativo como solução ou complemento no abastecimento de água (ANDRADE, 2010).

Atualmente, tem-se uma grande procura pela água subterrânea como fonte para o abastecimento, tanto urbano quanto rural, visto que as águas superficiais se tornam cada vez mais poluídas e escassas. Outro motivo que torna o uso das águas subterrâneas mais atraente é o custo de captação e distribuição, geralmente inferior aos que são exigidos para os sistemas abastecidos por mananciais de superfície (RIBEIRO, 2013).

A região nordeste do Brasil caracteriza-se por apresentar algumas regiões como de clima semiárido, onde a quantidade de chuvas é escassa e de forma concentrada. Neste cenário, a agricultura irrigada surge como alternativa para a sustentabilidade econômica da atividade agrícola. Em função das características climáticas e geológicas da região, a água subterrânea constitui importante forma de reserva hídrica (ANDRADE JUNIOR, *et. al.*, 2006).

O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), criado sob o nome de Inspeção de Obras Contra as Secas (IOCS) através do Decreto nº 7.619, de 21

de outubro de 1909, foi, até a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), o órgão responsável pelo socorro às populações flageladas pelas cíclicas secas que assolam a região semiárida, no nordeste do Brasil.

No nordeste do Brasil, a perfuração de poços tubulares vem sendo utilizada como uma alternativa para suprir o abastecimento de água de pequenas comunidades. Entretanto, apenas a partir do início da década de 1960, com a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), criada originalmente pela Lei nº 3.692 de 1959, e, conseqüentemente, com o surgimento da Hidrogeologia no Brasil, os poços perfurados nessa região passaram a ter um acompanhamento técnico na locação e perfuração. Porém, pelo fato destas ações serem tomadas de forma emergenciais, muitos destes poços não eram instalados e, até mesmo, eram abandonados quando passava o período de estiagem (CPRM/MME, 1998).

A exploração das águas subterrâneas do estado da Bahia, feita pela CERB, principal órgão de fomento à perfuração e distribuição de água dos mananciais subterrâneos, conta até outubro de 2017 com, aproximadamente, 17.262 poços tubulares (sendo que 11.696 perfurados pela própria CERB e 5.566 por empreiteiras contratadas) (CERB, 2017). Em sua maioria, esses poços são perfurados para implantação de sistemas simplificados de abastecimento de água potável para as pequenas comunidades rurais.

No Brasil, até novembro de 2017, tem-se conhecimento da existência de pelo menos 289.951 mil poços, cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (CPRM, 2017). A água de poços e de fontes naturais vem sendo utilizada intensamente para diversos fins, tais como abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. Alguns domicílios utilizam exclusivamente água subterrânea, representando o principal manancial hídrico, embora o uso do manancial subterrâneo seja complementar ao superficial em muitas regiões do país (MMA/PNRH, 2006). Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), 99% dos municípios brasileiros possuem serviço de abastecimento de água por rede geral de distribuição, sendo que desses, aproximadamente 77% dos municípios são abastecidos, para fins domésticos, com água subterrânea.

Dessa forma, como muitas vezes a água subterrânea é utilizada diretamente para consumo humano, sem tratamento prévio, as propriedades físicas, químicas e

biológicas da água são usadas como parâmetros para estudar a qualidade das águas e saber se a água captada naquele manancial subterrâneo está no nível aceitável para o consumo humano.

3.2. Qualidade da Água Subterrânea

Na captação de água subterrânea além do aspecto da quantidade, é importante conhecer a qualidade da água, tendo em vista o uso proposto para a água captada. A qualidade é definida pelas características físicas, químicas e biológicas da água e de acordo com os valores encontrados para cada um destes parâmetros, é possível estabelecer os diferentes usos: consumo humano, irrigação, industrial etc.

A exploração da água subterrânea está condicionada a dois fatores: quantidade (relacionada à condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e transmissibilidade de terrenos, etc.) e qualidade (composição mineralógica de rochas, condições climáticas e renovação das águas).

A hidrogeoquímica relaciona a composição química da água com os processos (físico-químico-biológicos) e reações que ocorrem no meio subterrâneo. Busca a compreensão da origem dos componentes presentes e da evolução química que ocorre nos sistemas subterrâneos, de grande interesse para o uso das águas subterrâneas (MESTRINHO, 2001).

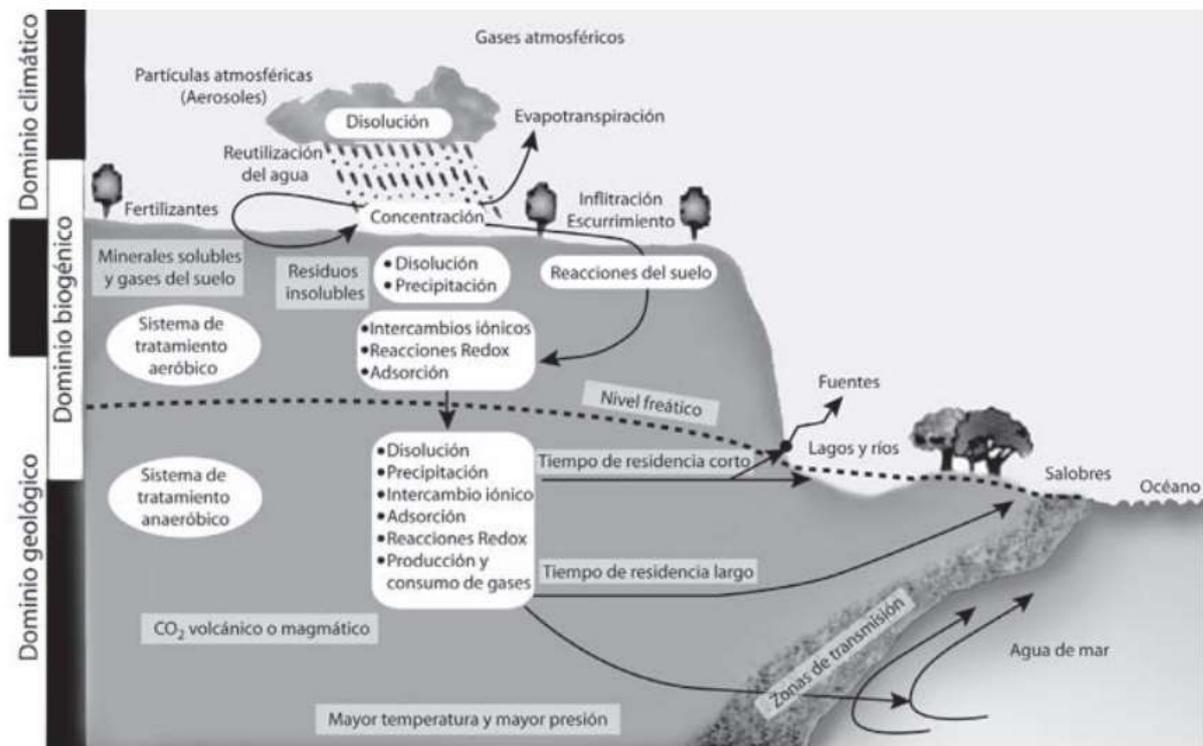
A concentração de substâncias dissolvidas na água subterrânea tende a aumentar à medida que percola os diferentes ambientes. Portanto, um estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e os constituintes químicos presentes nas águas, estabelecendo uma relação com o meio físico.

Contudo, outros fatores interferem na qualidade da água, tais como: clima, relevo, vegetação, pluviosidade, composição da água da recarga, tempo de contato com o meio físico, litologias atravessadas, condições hidrológicas locais, além da contaminação por atividades antrópicas (FEITOSA *et. al.*, 2008).

O homem é apontado como principal agente degradante dos recursos naturais. No entanto, fatores naturais não podem ser desprezados, a exemplo dos processos de dissolução das rochas. Outros processos e fatores influentes na qualidade das águas subterrâneas são: a composição atmosférica; a precipitação/dissolução; a infiltração;

a lixiviação dos sais; o intemperismo; a troca iônica; as reações redox; as reações biogeoquímicas; a interação água-rocha, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – O ciclo hidrogeoquímico



Fonte: Delgado, et. al., 2005 adaptado de Lloyd, 1999

Como a água subterrânea é muito utilizada para fins de abastecimento humano, é necessário o monitoramento e análise de parâmetros físicos, químicos e biológicos que fornecem uma ideia da qualidade da água subterrânea de um determinado local (FEITOSA *et. al.*, 2008).

Segundo o Ministério da Saúde, água potável é a água que não oferece riscos à saúde e se adequa ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011) para os parâmetros físicos, químicos, organolépticos e bacteriológicos da água.

3.2.1 Parâmetros Físicos e Químicos de Interesse em Águas Subterrâneas

Os parâmetros físicos são características de ordem estética, e alguns desses parâmetros em teores elevados podem causar rejeição por parte dos consumidores.

Enquadram-se como parâmetros físicos os seguintes: cor, sabor, odor, temperatura, transparência, turbidez e sólidos em suspensão (voláteis e totais).

Cor, odor e sabor são características físicas perceptíveis pelo consumidor. Odor e sabor são decorrentes de sais dissolvidos em quantidade excessiva. A cor é consequência da presença de substâncias dissolvidas, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico. Sua intensidade aumenta com o pH. Da mesma forma, a cor é influenciada por matérias sólidas em suspensão (turbidez), que devem ser eliminadas antes da medição da cor na amostra de água (ZIMBRES, 2002).

A turbidez é causada por materiais sólidos em suspensão (silte, argila, colóides, matéria orgânica, etc.). A cor da água interfere negativamente na medida da turbidez devido à sua propriedade de absorver luz. As águas subterrâneas normalmente não apresentam problemas devido ao excesso de turbidez. Em alguns casos, águas ricas em íons de ferro, podem apresentar uma elevação de sua turbidez quando entram em contato com o oxigênio do ar (ZIMBRES, 2002).

Estão enquadrados como parâmetros físico-químicos de interesse no estudo da qualidade da água: pH, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica, dureza e salinidade.

A condutividade elétrica, capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica, depende da presença de íons (concentração, mobilidade e valência dos íons) e temperatura. Assim, quanto maior a concentração de íons numa água, maior será a sua condutividade elétrica (CARMO, 2016).

Já os parâmetros químicos das águas subterrâneas refletem os meios por onde percolam, guardando uma relação com os tipos de rochas drenadas e com os produtos das atividades humanas adquiridas ao longo de seu trajeto (ZIMBRES, 2002). Entre os parâmetros enquadrados como químicos estão: ferro, cloreto, sulfato, amônia, nitrato, fósforo, fluoretos, potássio, sódio, entre outros.

Por ser eficaz na dissolução de sais, devido à constante dielétrica muito alta e porque suas moléculas tendem a se combinar com íons para formar íons hidratados, a água possui agitação térmica suficientemente grande para superar a atração de carga entre os íons, permitindo assim que um grande número de íons se dissocie em solução aquosa. A água subterrânea pode ser vista como uma solução eletrolítica porque

quase todos os seus constituintes dissolvidos estão presentes na forma iônica (Freeze e Cherry, 1979).

Dentre as águas usadas para consumo humano, as águas subterrâneas são as que contém uma grande variedade de constituintes dissolvidos em várias concentrações. De acordo com Freeze e Cherry (1979), uma classificação das espécies inorgânicas que ocorrem nas águas subterrâneas é mostrada no Quadro 1. Os constituintes principais ocorrem na forma iônica (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}). Os silicatos, carbonatos, sulfatos e cloretos são os principais componentes das rochas, por isso, esses são os íons predominantes naturalmente encontrados nas águas subterrâneas (FEITOSA *et. al.*, 2008).

Quadro 1 – Classificação dos constituintes inorgânicos dissolvidos na água subterrânea

Constituintes maiores (acima de 5 mg L⁻¹)	
Bicarbonato	Silicone
Cálcio	Sódio
Cloreto	Sulfato
Magnésio	Ácido carbônico
Constituintes menores (0,01 a 1 mg L⁻¹)	
Boro	Nitrato
Carbonato	Potássio
Fluoreto	Estrôncio
Ferro	

Fonte: O autor, adaptado de Freeze e Cherry (1979).

Alguns desses constituintes principais das águas subterrâneas estão descritos a seguir:

- Cálcio: é um dos cátions mais comuns em águas doces. É encontrado em rochas contendo calcário, calcita, dolomita, apatita e gipsita. Íon metálico alcalino-terroso, que quase sempre está associado a íons sulfato e carbonatos (PAULI, 2014; DI BERNARDO & DANTAS, 2005).
- Magnésio: possui uma solubilidade elevada. Os minerais mais comuns fornecedores de magnésio para as águas subterrâneas são: biotita, anfibólios e piroxênios. Em região de rochas carbonáticas, o mineral dolomita é um importante fornecedor de magnésio. Íon metálico alcalino-terroso que quase sempre está associado a íons sulfato (ZIMBRES, 2002; PAULI, 2014; DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

- Sódio: é um constituinte de rochas ígneas liberado pelo intemperismo dos silicatos presentes nas rochas. Seus principais minerais fonte (feldspatos plagioclásios) são pouco resistentes aos processos intempéricos, principalmente os químicos. Os sais formados nestes processos são muito solúveis (CELLIGOI, 1999; ZIMBRES, 2002).
- Potássio: é raramente encontrado em concentrações maiores que o sódio, pois é facilmente fixado pelas argilas e consumido pelas plantas. Seus principais minerais fontes são: feldspato potássico, mica moscovita e biotita, pouco resistentes aos intemperismos físico e químico. Tendem a formar minerais secundários (ZIMBRES, 2002).
- Cloreto: todas as águas naturais contêm íons resultantes da dissolução de minerais. O cloreto também pode estar presente na água através da intrusão salina, dos despejos domésticos e industriais ou através das águas utilizadas em irrigações (VON SPERLING, 2005).
- Sulfato: o íon sulfato é um dos principais ânions que ocorrem em águas naturais, tem grande importância na água de abastecimento devido ao seu efeito laxativo sobre os seres humanos quando está presente em quantidades excessivas. Nas águas subterrâneas a presença de SO_4^{2-} está associada à dissolução de solos e rochas como o gesso (CaSO_4), o sulfato de magnésio (MgSO_4) e oxidação de sulfetos (sulfeto de ferro - a pirita) (PIVELI & KATO, 2005).

A solubilidade e mobilidade dos elementos constituintes das águas subterrâneas depende do potencial iônico, entre outros fatores. Desse modo, de acordo com Szikszay (1993), “como uma medida do elemento na água, o coeficiente de mobilidade K_x (relação entre a concentração do elemento na água e a concentração na rocha) proposto por Perel'man (1963) pode ser usado”, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Mobilidade das substâncias

Mobilidade	Valor de K_x	Exemplos
Substâncias muito móveis	$n \times 10 - n \times 100$	Cl^- , SO_4^{2-}
Substâncias moderadamente móveis	$n - n \times 10$ ($n < 2$)	Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+
Substâncias móveis	$0 \text{ n} - n$ ($n < 5$)	Si , P , K^+
Substâncias pouco móveis e inertes	0.0 n e abaixo	Fe^{3+} , Cr^{3+} , Al^{3+} , Pb^{2+}

Fonte: O autor, adaptado de Szikszay (1993).

As águas de precipitação não trazem os elementos CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e NO_3^- , portanto, é o intemperismo causado pelo contato água/rocha que os fornecerá. Constata-se também, uma diminuição da razão K/Na nas águas subterrâneas, uma vez que o K^+ se fixa no solo (SZIKSZAY, 1993).

O contato água/rocha causa a solubilização dos componentes como também a precipitação dos mesmos nas cavidades da rocha. Contudo, existe uma variação na solubilidade, que é controlada pela temperatura, pressão, pH, pluviosidade, entre outros fatores. Além disso, durante o percurso, a água pode sofrer modificações na sua composição química inicial, devido a processos como por exemplo: redução de sulfatos, troca iônica, etc., os quais não dependem somente da geologia, mas também do tamanho das partículas (SZIKSZAY, 1993).

3.2.2 Fatores Influentes na Qualidade das Águas Subterrâneas

Como já mencionado anteriormente, existem alguns fatores naturais que interferem na qualidade da água, tais como: clima, relevo, vegetação, pluviosidade, litologia, condições hidrológicas locais etc. Em suma, os principais componentes do Ciclo Hidrogeoquímico são relacionados por uma complexa sequência de processos e reações que ocorre entre os domínios litogênico, biogênico e climático. A seguir serão apresentados os fatores que são foco deste trabalho, identificados por alguns autores, aos quais a química da água subterrânea está relacionada.

O fator precipitação (taxa de pluviosidade e que está diretamente relacionada com fatores climáticos) se constitui como a principal fonte de recarga dos aquíferos, além de determinarem o tipo e a intensidade de intemperismo atuante nas rochas. Como consequência da maior pluviosidade, tem-se um manto de intemperismo mais espesso e uma sensível melhoria nas condições de recarga, influenciando na produção dos poços e qualidade química de suas águas (GUERRA & NEGRÃO, 1996).

A precipitação influencia diretamente a vazão e a qualidade de um corpo de água, à medida que desencadeia processos erosivos que aumentam a turbidez, a cor e o teor de matéria orgânica nas águas, uma vez que durante as precipitações predominam as entradas de água de escoamento superficial, lixiviando os sais para as águas subterrâneas, aumentando assim, os valores de salinidade (FRITZSONS *et al.*, 2003).

Sabe-se que na época de estiagem os açudes e poços têm seus níveis de concentração de sais mais elevados, principalmente nesta época, quando também são mais elevadas a temperatura e a evapotranspiração da região. Outro fator de grande importância, citado pelos autores, é a condição de circulação da água, cujas fraturas de menor profundidade (abaixo de 40 m) se intercomunicam com os aluviões, favorecendo a renovação do aquífero, enquanto nas fraturas mais profundas a circulação é mais restrita, com condições mais estagnantes, havendo maior intercâmbio com a rocha e, assim, a influência litológica se sobrepõe à climática (SILVA JUNIOR, 1999).

Com relação à influência da litologia, na interação água-rocha, a intensidade da decomposição química depende da resistência dos minerais e do grau de reatividade química da água. O intemperismo químico nas rochas deixa maior teor de sais quando a renovação de água é deficiente, por exemplo, em locais com baixa pluviosidade. O intemperismo químico nas rochas tem constituição e espessura de acordo com a natureza da rocha. A rocha matriz tem forte influência nos estágios iniciais de intemperização, decrescendo à medida que o manto de alteração evolui (FEITOSA *et. al.*, 2008).

O intemperismo é a fonte predominante de constituintes químicos principais de águas naturais como CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ . A lixiviação desses constituintes químicos através do perfil do solo tem forte influência da geologia e do tipo de solo nas águas dos mananciais a eles associados.

3.3. Sulfato em Águas

Sulfato é o íon SO_4^{2-} , consistindo de um átomo central de enxofre ligado a quatro átomos de oxigênio, sendo um dos ânions mais abundantes na natureza.

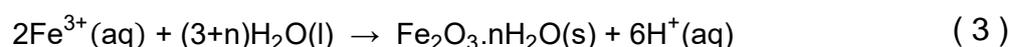
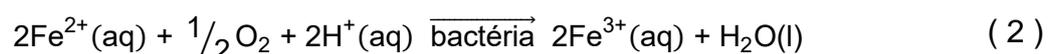
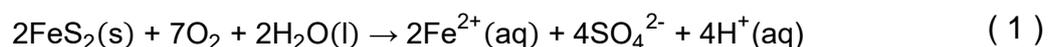
Os sais, que possuem o ânion sulfato ligado a um ou mais elementos metálicos, formam compostos iônicos moderadamente a muito solúveis, exceto sulfato de estrôncio (SrSO_4), sulfato de bário (BaSO_4) e sulfato de cálcio (CaSO_4), nessa ordem (FEITOSA *et. al.*, 2008), pois, apresentam uma elevada energia de ligação entre os cátions (Ca^{2+} , Sr^{2+} e Ba^{2+}) e o sulfato, visto que todos eles possuem carga 2+ e o sulfato possui carga 2-. Assim, o rompimento dessa ligação torna-se mais difícil.

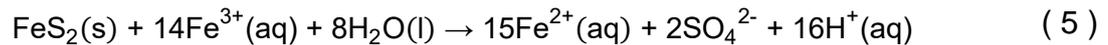
Águas naturais geralmente apresentam teores de sulfato inferiores a 100 mg L⁻¹, principalmente na forma de SO₄²⁻ e HSO₄⁻ (FEITOSA *et. al.*, 2008). No entanto, o período chuvoso aumenta o contato da água da chuva com rochas e as reações que produzem derivados de enxofre, como o sulfato. Estes são carregados e se acumulam nos aquíferos. Como também, em regiões áridas onde minerais sulfatados, tal como o gesso (CaSO₄), estão presentes, essas concentrações podem ser bastante elevadas.

Muitos dos processos físico-químicos que ocorrem no sistema água-rocha-atmosfera têm características óxido-redutoras. Assim, sulfetos insolúveis, na presença de oxigênio, são oxidados a sulfatos. A velocidade de oxidação depende da granulometria do mineral onde estão os sulfetos, fluxo de oxigênio, etc. Esse processo dá origem ao enriquecimento das águas subterrâneas com o ânion sulfato (SO₄²⁻) (PINTO, 2006).

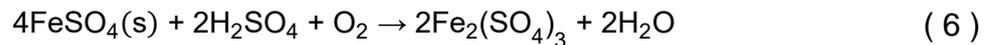
Pirita (FeS₂) é o mais abundante dos minerais de sulfetos ocorrendo em quase todos os ambientes geológicos. Outro mineral de sulfeto comum é a marcassita (FeS₂), que apresenta a mesma composição química da pirita, porém, possuem estruturas cristalinas diferentes, sendo assim, a marcassita é um polimorfo da pirita. Ambos são encontrados, geralmente, em carvão e minérios sulfetados de cobre, chumbo e zinco (ATENCIO, 1986).

O referido processo de oxidação de minerais também é conhecido por drenagem ácida de rocha (DAR) (INAP, 2003). Um exemplo de oxidação natural de minerais sulfetados contidos em rochas, quando expostas à ação da água, é o da pirita (FeS₂). O processo de oxidação do sulfeto de ferro dando origem ao ânion sulfato tem sido descrito pelas seguintes equações químicas (FEITOSA *et. al.*, 2008):





Ainda de acordo com Feitosa (2008), o sulfato ferroso (FeSO_4) em presença de excesso de oxigênio passa a sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), conforme a equação (6):



O íon sulfato, originado a partir da oxidação dos sulfetos, é precipitado e carregado em solução, sendo depositado sob a forma de eflorescências, crostas, acumulações em cavernas ou constituinte de caliche e evaporitos. Os evaporitos possuem composição mineralógica incluindo sulfatos, cloretos e carbonatos de sódio e cálcio, com quantidades menores de sais de potássio e magnésio. Já depósitos de caliche originam-se em regiões áridas e semiáridas, em que geralmente o carbonato de cálcio é o constituinte mais abundante, seguindo-se de sulfatos de cálcio, sódio e potássio (ATENCIO, 1986).

Conforme o trabalho de Atencio (1986), sulfatos pouco solúveis, como a barita (BaSO_4) e a jarosita ($\text{KFe}_3^{3+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), são transportados em fase sólida, depositando-se como clásticos. Sulfatos metamórficos fazem parte dos meta-evaporitos.

Feitosa *et. al.* (2008) apontam ainda como fontes de sulfato nas águas subterrâneas a dissolução de solos e rochas (sedimentares e metamórficas), como xisto, gesso, bassanita, evaporitas de Keuper, celestina, anglesita, alunita, copiapite, bem como proveniente das poeiras e da decomposição das matérias orgânicas pelas bactérias. No entanto, a maior contribuição desses íons é originada da dissolução de compostos sulfatados como a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), distribuída nas rochas sedimentares.

Ainda como fontes de sulfato nas águas subterrâneas podem ser destacados: argilas arenosas de tons cinza-esverdeados e inclusive avermelhados; depósitos argilo-arenosos negros ricos em matéria orgânica e enxofre; minerais de óxido de ferro e restos fósseis vegetais carbonizados.

Segundo Kovda (1973) os principais sais presentes nos solos e águas são o cloreto de sódio (NaCl), o sulfato de magnésio (MgSO_4), o sulfato de sódio (Na_2SO_4), o cloreto de magnésio (MgCl_2) e o carbonato de sódio (Na_2CO_3).

O sulfato possui interesse sanitário para águas de abastecimento público por sua ação laxativa, como o sulfato de magnésio e o sulfato de sódio. Pessoas que não estão acostumadas a consumir água com níveis elevados de sulfato podem ser acometidas por disenterias e desidratação. As crianças são, muitas vezes, mais sensíveis ao sulfato do que os adultos. Além disso, o sulfato traz sabor às águas: salgado (Na_2SO_4) e amargo (CaSO_4 e MgSO_4) (FEITOSA *et. al.*, 2008). Então, existe a necessidade de se ter um monitoramento de sua concentração na água.

3.3.1. Especificação Química do Sulfato em Águas

Espécie química é uma forma utilizada para designar um elemento, um íon, um grupo de átomos ou uma molécula. A especificação é representada, geralmente, por composição isotópica, estado de oxidação, estrutura molecular/complexo, etc.

A análise da especificação química de um elemento consiste numa atividade analítica de identificação e/ou quantificação das diferentes formas químicas (uma ou mais espécies) de um elemento, ou a distribuição de uma espécie química de um elemento na amostra (IUPAC, 2008).

Um dos métodos aplicados no estudo da especificação química de elementos é o método *Tableau*, que consiste em uma matriz de coeficientes estequiométricos em que as colunas são definidas pelos componentes, enquanto as linhas da parte superior são definidas pelas espécies presentes no sistema e as linhas da parte inferior são definidas pelas espécies que compõem (constituem, dão forma) aquele determinado sistema (MOREL, 1993). Segundo Morel (1993), esse método, embora tenha uma aparência pouco intuitiva, é uma maneira matemática e estequiométrica de resolver problemas complexos de equilíbrio químico, de forma simples e elegante.

A fim de exemplificar a matriz de coeficientes estequiométricos, tem-se a Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos do método *Tableau*

		Componentes			
		H ⁺	OH ⁻	CO ₂	Ca ²⁺
Espécies	H ₂ O	1	1		
	H ⁺	1			
	OH ⁻		1		
	CO ₂			1	
	HCO ₃ ⁻		1	1	
	Ca ²⁺				1
Constituintes	CaCO ₃	-1	1	1	1
	CO ₂			1	
	H ₂ O	1	1		

Fonte: Morel (1993).

As fórmulas químicas das espécies em função dos componentes são escritas horizontalmente (linhas), como pode ser observado no Quadro 3.

Quadro 3 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos e fórmulas estequiométricas das espécies em função dos componentes

		Componentes				Fórmulas Estequiométricas
		H ⁺	OH	CO ₂	Ca ²⁺	
Espécies	H ₂ O	1	1			H ₂ O = (H ⁺) ₁ (OH ⁻) ₁
	H ⁺	1				H ⁺ = (H ⁺) ₁
	OH		1			OH ⁻ = (OH ⁻) ₁
	CO ₂			1		CO ₂ = (CO ₂) ₁
	HCO ₃ ⁻		1	1		HCO ₃ ⁻ = (CO ₂) ₁ (OH ⁻) ₁
	Ca ²⁺				1	Ca ²⁺ = (Ca ²⁺) ₁
Constituintes	CaCO ₃	-1	1	1	1	CaCO ₃ = (Ca ²⁺) ₁ (CO ₂) ₁ (OH ⁻) ₁ (H ⁺) ₋₁
	CO ₂			1		CO ₂ = (CO ₂) ₁
	H ₂ O	1	1			H ₂ O = (H ⁺) ₁ (OH ⁻) ₁

Fonte: O autor, adaptado de Morel (1993).

No *Tableau*, os componentes são definidos como um conjunto de entidades químicas que permitem uma descrição completa da estequiometria de um sistema. Dessa forma, esses componentes devem fornecer uma fórmula estequiométrica completa e única para cada espécie química no sistema, bem como, os balanços molares correspondentes aos componentes devem proporcionar uma expressão completa de conservação para o sistema químico.

O número de componentes (N_c) para um determinado sistema químico é independente do conjunto particular de componentes que é escolhido, e é igual ao número de espécies (N_s) menos o número de (independentes) reações químicas (N_r)

entre essas espécies. A água (H₂O) e o íon H⁺ são sempre escolhidos como componentes.

Os coeficientes das equações de balanço de mols são verificados verticalmente (colunas), como evidenciado no Quadro 4.

Quadro 4 – Exemplo da matriz de coeficientes estequiométricos e equações de balanço de mols

		Componentes			
		H ⁺	OH ⁻	CO ₂	Ca ²⁺
Espécies	H ₂ O	1	1		
	H ⁺	1			
	OH ⁻		1		
	CO ₂			1	
	HCO ₃ ⁻		1	1	
	Ca ²⁺				1
Receita	CaCO ₃	-1	1	1	1
	CO ₂			1	
	H ₂ O	1	1		

$$\text{TOT}H^+ = [H_2O] + [H^+] = -[CaCO_3]_T + [H_2O]_T$$

$$\text{TOT}OH^- = [H_2O] + [OH^-] + [HCO_3^-] = [CaCO_3]_T + [H_2O]_T$$

$$\text{TOT}CO_2 = [CO_2] + [HCO_3^-] = [CaCO_3]_T + [CO_2]_T$$

$$\text{TOT}Ca^{2+} = [Ca^{2+}] = [CaCO_3]_T$$

} Equações de balanço de mols para cada componente

Fonte: O autor, adaptado de Morel (1993).

O método *Tableau* também utiliza como premissa a questão da eletroneutralidade, uma vez que qualquer sistema químico real é constituído por componentes químicos neutros e nenhuma carga elétrica pode ser criada ou perdida em qualquer das reações. Por esse motivo, a equação de eletroneutralidade que expressa o equilíbrio de cargas positivas e negativas no sistema deve ser verificada.

A compreensão da especiação química é fator importante, que pode elucidar o mecanismo através do qual uma espécie química é originada em um ambiente aquático. Então, uma justificativa plausível para realizar estudos de especiação é que uma espécie de um elemento pode ter um impacto maior sobre os seres vivos do que outra espécie química. Somente pelo conhecimento da especiação e pela compreensão da fonte se torna possível entender integralmente um ambiente aquático (NIENCHESKI *et al.*, 2008).

Muitos estudos são realizados para especiação química de metais em águas e solos, visto que os metais, ainda que em pequenas concentrações, possuem efeito danoso à saúde humana, quando presentes na água ou no solo.

Entretanto, a revisão bibliográfica, desenvolvida no presente trabalho, constatou que praticamente não existem, na literatura nacional brasileira, estudos da especiação química do sulfato em águas subterrâneas.

Conforme foi abordado nos tópicos anteriores o sulfato possui diferentes fontes, o que pode indicar a existência de diversos compostos formados com o ânion sulfato. Sendo assim, é justificável o estudo da especiação química do sulfato nas águas subterrâneas, reforçada ainda a sua importância, pois alguns compostos de sulfato possuem efeitos laxativos quando em concentrações acima de 250 mg L⁻¹, valor legislado (BRASIL, 2008 e 2011).

Entre os principais tipos de sulfatos estão os listados no Quadro 5:

Quadro 5 - Espécies químicas de sulfato com suas fórmulas

Nome	Fórmula
Sulfato de alumínio	Al ₂ (SO ₄) ₃
Sulfato de alumínio e potássio	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
Sulfato de bário	BaSO ₄
Sulfato de berílio	BeSO ₄
Sulfato de cálcio	CaSO ₄
Sulfato de cálcio dihidratado	CaSO ₄ .2H ₂ O
Sulfato de cálcio hemihidratado	CaSO ₄ .1/2H ₂ O
Sulfato duplo de cálcio e sódio	CaNa ₂ (SO ₄) ₂
Sulfato de chumbo	PbSO ₄
Sulfato de cobre	CuSO ₄
Sulfato de estrôncio	SrSO ₄
Sulfato férrico	Fe ₂ (SO ₄) ₃
Sulfato ferroso	FeSO ₄
Sulfato hidratado de ferro e potássio	K ₂ Fe ₆ (OH) ₁₂ (SO ₄) ₄
Sulfato de magnésio	MgSO ₄
Sulfato de magnésio hidratado (sal de Epsom)	MgSO ₄ .7H ₂ O
Sulfato de manganês II	MnSO ₄
Sulfato de potássio	K ₂ SO ₄
Sulfato de potássio e magnésio	K ₂ SO ₄ .2MgSO ₄
Sulfato de sódio	Na ₂ SO ₄
Sulfato de zinco heptahidratado	ZnSO ₄ .7H ₂ O

Fonte: O autor.

A partir dos tipos de sulfato listados no Quadro 5, constata-se que o ânion sulfato pode formar complexos combinando-se com os seguintes elementos: alumínio (Al), potássio (K), bário (Ba), berílio (Be), cálcio (Ca), sódio (Na), chumbo (Pb), cobre (Cu), estrôncio (Sr), ferro (Fe), magnésio (Mg), manganês (Mn) e zinco (Zn).

3.3.1.1. Estudos de Correlação entre Sulfato e outros parâmetros da qualidade da água

O termo correlação, em estatística, indica a força da relação entre duas variáveis, isto é, se valores altos (ou baixos) de uma das variáveis implicam em valores altos (ou baixos) da outra variável.

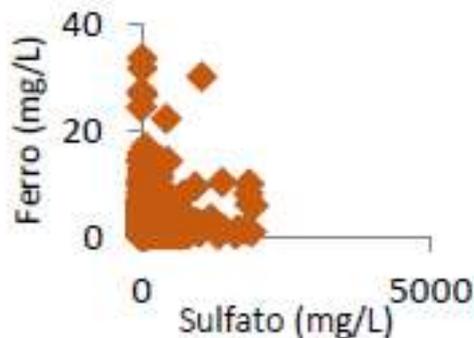
O diagrama de dispersão é utilizado para representar graficamente valores simultâneos de duas variáveis relacionadas, mostrando o que acontece com uma variável quando a outra se altera. Desta forma, a representação através de gráficos de dispersão é uma forma simples de verificar o tipo de correlação existente entre duas variáveis.

Os gráficos de dispersão podem evidenciar correlação positiva, negativa ou nula. Quando os pontos tendem a formar uma reta ascendente, a correlação entre as variáveis é positiva, indicando que quando uma variável aumenta, a outra também aumenta. Quando os pontos tendem a formar uma reta descendente, a correlação entre as variáveis é negativa, indicando que a correlação é inversa, ou seja, quando uma variável aumenta, a outra diminui. Quando os pontos estão aglomerados, sem tendência à formação de uma reta ascendente ou descendente, significa uma inexistência de correlação entre as variáveis ou correlação nula.

Durante a revisão bibliográfica, foi encontrado o trabalho de Carmo (2016) que utilizou a análise estatística bivariada e a geração de gráficos para correlacionar o ferro com 15 parâmetros físicos e químicos de qualidade da água (cor aparente, turbidez, pH, alcalinidade de carbonatos e bicarbonatos, sólidos totais dissolvidos, cálcio, magnésio, dureza total, cloreto, sulfato, fluoreto, condutividade elétrica, nitrito e nitrato), para todos os domínios hidrogeológicos do estado da Bahia. Assim sendo, os diagramas de dispersão tiveram como objetivo, analisar o relacionamento entre o ferro e os demais parâmetros (CARMO, 2016).

Desse trabalho de Carmo (2016), constatou-se que o gráfico de dispersão entre o sulfato e o ferro não teve uma tendência à formação de uma reta (ascendente ou descendente), portanto, indicando uma correlação linear nula entre ferro e sulfato, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Gráfico de dispersão referente à relação entre ferro e sulfato nos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia



Fonte: Carmo, 2016

Para Lira (2004), quando a análise envolve um grande número de variáveis e há interesse em conhecer a correlação entre os pares de variáveis, é comum a construção de uma matriz de correlação.

Existem alguns coeficientes que medem o grau de correlação entre parâmetros, sendo mais conhecido o coeficiente de correlação de Pearson. Esse, é um coeficiente de correlação paramétrico e só pode ser utilizado para variáveis quantitativas.

O coeficiente de correlação linear de Pearson pode variar de -1 a $+1$. Um coeficiente de $+1$ indica uma correlação perfeitamente positiva, isto é, quando os valores se correlacionam de forma direta: valores pequenos de uma variável relacionam-se a valores pequenos da outra variável ou valores grandes de uma variável relacionam-se a valores grandes da outra variável. Por outro lado, um coeficiente de correlação -1 indica uma correlação perfeitamente negativa, ou seja, quando as variáveis se correlacionam de maneira inversa, tal que, quando os valores de uma variável aumentam, os valores da outra variável diminuem, e vice-versa (BARBETTA, 2002).

A matriz de correlação de Pearson, técnica paramétrica, restringe-se à verificação de correlação linear entre variáveis, supondo que os dados a serem analisados possuam distribuição normal, simétrica.

Em contraposição, existe a técnica não paramétrica, a matriz de correlação de Spearman, que em geral é utilizada para dados não quantitativos, porém, pode também ser utilizada para dados quantitativos, quando não se tem convicção de que esses dados são Gaussianos. A matriz de Spearman é indicada quando os dados possuem distribuição muito assimétrica, já que não requer a suposição que os dados possuam distribuição normal, e/ou com valores discrepantes. As técnicas não paramétricas não necessitam de suposição sobre a distribuição dos dados em análise, não requer o conhecimento prévio de que os dados a serem analisados possuam distribuição normal, simétrica (BARBETTA, 2002).

O coeficiente de correlação de Spearman também varia de -1 a $+1$, sendo um coeficiente de $+1$ indicativo de uma correlação perfeitamente positiva, e um coeficiente de correlação -1 indicativo de uma correlação perfeitamente negativa.

No trabalho de Carmo (2016) foram aplicados os dois métodos – Pearson (paramétrico) e Spearman (não paramétrico) – na tentativa de buscar a melhor correlação entre o ferro e os parâmetros físicos e químicos citados. A partir dos resultados obtidos por Carmo (2016) para os dados processados na matriz de correlação linear de Pearson, apresentado na Figura 4, foi inferida a correlação entre o sulfato e os parâmetros por ele estudados, mostrando uma forte correlação entre o sulfato e os seguintes parâmetros: sólidos totais dissolvidos (coeficiente de correlação: 0,72), cálcio (coeficiente de correlação: 0,72), dureza (coeficiente de correlação: 0,71), condutividade elétrica (coeficiente de correlação: 0,71), cloreto (coeficiente de correlação: 0,68), magnésio (coeficiente de correlação: 0,66), alcalinidade bicarbonato (coeficiente de correlação: 0,36) e fluoreto (coeficiente de correlação: 0,35).

Figura 4 – Matriz de correlação linear de Pearson

	STD	Cloreto	Dureza	Nitrato	AlcalHCO	AlcalCO	AlcalOH	Calcio	CE	Cor	Ferro	Fluoreto	Magnésio	Nitrito	PH	Sulfato	Turbidez
STD	1,00																
Cloreto	0,98	1,00															
Dureza	0,96	0,95	1,00														
Nitrato	0,10	0,11	0,13	1,00													
AlcalHCO	0,41	0,37	0,41	0,26	1,00												
AlcalCO	0,09	0,11	0,07	-0,01	0,10	1,00											
AlcalOH	0,06	0,09	0,07	0,03	0,04	0,28	1,00										
Calcio	0,88	0,87	0,93	0,16	0,42	0,05	0,09	1,00									
CE	0,97	0,99	0,93	0,13	0,42	0,12	0,10	0,86	1,00								
Cor	-0,01	-0,02	-0,02	-0,05	-0,07	-0,06	-0,15	-0,02	-0,03	1,00							
Ferro	0,16	0,15	0,16	-0,11	-0,05	-0,06	-0,05	0,17	0,13	0,32	1,00						
Fluoreto	0,34	0,38	0,36	0,19	0,40	0,06	-0,03	0,40	0,40	-0,04	-0,03	1,00					
Magnésio	0,94	0,93	0,97	0,10	0,38	0,08	0,06	0,84	0,91	-0,02	0,15	0,31	1,00				
Nitrito	0,09	0,14	0,12	0,29	0,10	0,02	0,11	0,11	0,15	-0,02	-0,02	0,24	0,12	1,00			
PH	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,33	0,21	-0,08	0,02	0,02	-0,01	-0,17	0,19	0,00	0,01	1,00		
Sulfato	0,72	0,68	0,71	0,08	0,36	0,06	0,10	0,72	0,71	-0,04	0,11	0,35	0,66	0,07	0,03	1,00	
Turbidez	0,05	0,03	0,03	-0,04	-0,07	-0,05	-0,03	0,04	0,02	0,75	0,49	-0,05	0,02	-0,03	-0,06	0,01	1,00

Nota: o nível de significância é 0,20 para $\alpha = 0,05$.

Fonte: Carmo, 2016

Os sólidos totais dissolvidos correspondem à carga sólida em suspensão, e em geral, envolvem carbonato, bicarbonato, cloreto, sulfato, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, sódio, entre outros, o que justifica a correlação entre o sulfato e os sólidos totais dissolvidos. Já o cálcio se relaciona com o sulfato devido à dissolução de gesso, sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o que é atribuído, algumas vezes, às rochas sedimentares.

A relação entre a dureza e o sulfato pode ser justificada devido à dureza permanente ocasionada pela combinação dos íons cálcio e magnésio com os íons sulfato, entre outros.

A correlação com a condutividade elétrica já era esperada, visto que os sais dissolvidos e ionizados presentes na água transformam-na num eletrólito capaz de conduzir corrente elétrica.

Os resultados obtidos por Carmo (2016) para os dados processados na matriz de correlação de Spearman, apresentados na Figura 5, permitem inferir que há significativa correlação entre o sulfato e os seguintes parâmetros: condutividade elétrica (coeficiente de correlação: 0,82), sólidos totais dissolvidos (coeficiente de correlação: 0,81), cloreto (coeficiente de correlação: 0,80), magnésio (coeficiente de correlação: 0,79), dureza (coeficiente de correlação: 0,78), cálcio (coeficiente de correlação: 0,76), alcalinidade bicarbonato (coeficiente de correlação: 0,66), fluoreto (coeficiente de correlação: 0,59) e nitrato (coeficiente de correlação: 0,27).

Figura 5 – Matriz de correlação de Spearman

	STD	Cloreto	Dureza	Nitrato	AlcalHCO	AlcalCO	AlcalOH	Calcio	CE	Cor	Ferro	Fluoreto	Magnesio	Nitrito	PH	Sulfato	Turbidez
STD	1,00	0,91	0,93	0,25	0,75	0,03	0,01	0,90	0,97	-0,01	0,08	0,59	0,92	0,21	0,14	0,81	0,07
Cloreto	0,91	1,00	0,85	0,27	0,60	-0,04	-0,02	0,79	0,93	0,02	0,09	0,55	0,88	0,19	0,02	0,80	0,05
Dureza	0,93	0,85	1,00	0,23	0,81	0,04	0,03	0,98	0,96	-0,03	0,05	0,58	0,96	0,23	0,20	0,78	0,00
Nitrato	0,25	0,27	0,23	1,00	0,23	0,00	0,01	0,23	0,24	-0,08	-0,19	0,17	0,22	0,43	-0,04	0,27	-0,04
AlcalHCO	0,75	0,60	0,81	0,23	1,00	0,08	0,03	0,81	0,78	-0,09	-0,06	0,56	0,75	0,23	0,36	0,66	-0,10
AlcalCO	0,03	-0,04	0,04	0,00	0,08	1,00	0,84	0,06	0,04	-0,55	-0,10	-0,02	0,02	0,11	0,12	-0,01	-0,18
AlcalOH	0,01	-0,02	0,03	0,01	0,03	0,84	1,00	0,05	0,01	-0,57	-0,05	-0,07	0,02	0,13	-0,10	-0,02	-0,15
Calcio	0,90	0,79	0,98	0,23	0,81	0,06	0,05	1,00	0,92	-0,03	0,04	0,57	0,90	0,24	0,22	0,76	0,00
CE	0,97	0,93	0,96	0,24	0,78	0,04	0,01	0,92	1,00	-0,03	0,04	0,61	0,94	0,21	0,17	0,82	-0,01
Cor	-0,01	0,02	-0,03	-0,08	-0,09	-0,55	-0,57	-0,03	-0,03	1,00	0,42	0,04	-0,03	-0,10	-0,05	0,01	0,54
Ferro	0,08	0,09	0,05	-0,19	-0,06	-0,10	-0,05	0,04	0,04	0,42	1,00	-0,02	0,05	-0,08	-0,19	0,02	0,63
Fluoreto	0,59	0,55	0,58	0,17	0,56	-0,02	-0,07	0,57	0,61	0,04	-0,02	1,00	0,56	0,17	0,24	0,59	-0,08
Magnesio	0,92	0,88	0,96	0,22	0,75	0,02	0,02	0,90	0,94	-0,03	0,05	0,56	1,00	0,19	0,15	0,79	0,00
Nitrito	0,21	0,19	0,23	0,43	0,23	0,11	0,13	0,24	0,21	-0,10	-0,08	0,17	0,19	1,00	0,06	0,18	-0,06
PH	0,14	0,02	0,20	-0,04	0,36	0,12	-0,10	0,22	0,17	-0,05	-0,19	0,24	0,15	0,06	1,00	0,11	-0,20
Sulfato	0,81	0,80	0,78	0,27	0,66	-0,01	-0,02	0,76	0,82	0,01	0,02	0,59	0,79	0,18	0,11	1,00	-0,01
Turbidez	0,07	0,05	0,00	-0,04	-0,10	-0,18	-0,15	0,00	-0,01	0,54	0,63	-0,08	0,00	-0,06	-0,20	-0,01	1,00

Nota: o nível de significância é 0,20 para $\alpha = 0,05$.

Fonte: Carmo, 2016

Ressalta-se que no trabalho de Carmo (2016), apenas os cátions cálcio e magnésio foram estudados. Ambas as matrizes revelaram correlação entre o sulfato e o cálcio, e somente a matriz de correlação de Spearman mostrou correlação entre o sulfato e o magnésio.

No trabalho de Carmo (2016), a matriz de correlação de Spearman mostrou-se mais significativa na identificação da relação entre o sulfato e os parâmetros físicos e químicos, do que a matriz de correlação linear de Pearson. A matriz de Spearman identificou correlação entre sulfato e cloreto, bem como entre sulfato e magnésio, além dos parâmetros já identificados na matriz de Pearson.

A correlação entre sulfato e cloreto, espécies presentes na precipitação atmosférica, pode ser explicada pela possível procedência conjunta do cloreto e sulfato, na água da chuva. Já a correlação entre sulfato e magnésio pode ser justificada pelo composto sulfato de magnésio associado à dureza permanente em águas subterrâneas.

De acordo com o trabalho de Mirlean *et. al.* (2005), constata-se que o sulfato se relaciona inversamente com o cloreto. Em águas ricas em sulfato, a concentração de cloreto foi duas ou mais vezes menor, já nas águas em que o ânion predominante foi o cloreto, a concentração de sulfato foi dezenas de vezes mais baixa, o que foi justificado pela alta taxa de precipitação, composição dos solos e a vegetação local, que geram condições de formação de águas subterrâneas tendo como principal ânion o cloreto. Em contrapartida, em locais próximos às indústrias de fertilizantes verifica-

se significativa presença de sulfato, pois a composição litológica local não oferece proteção natural ao aquífero contra a infiltração dos poluentes na água subterrânea.

Fernandes (2011) em seu trabalho, obteve resultados em que se pode concluir que os teores de sulfato e ferro são influenciados pela sazonalidade, com o teor de sulfato aumentando com o período chuvoso e o de ferro diminuindo. A justificativa apresentada foi que no período chuvoso aumenta o contato da água da chuva com as rochas, produzindo derivados de enxofre como o sulfato, que são carregados e se acumulam nos aquíferos. Em relação ao ferro, o comportamento inverso ao sulfato foi atribuído à alteração da qualidade físico-química da água com o início do período chuvoso e a consequente precipitação de compostos de ferro.

Diante do que foi exposto, percebe-se a necessidade do estudo da correlação entre o sulfato e os parâmetros físicos e químicos, visto que diversos fatores podem interferir.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem como área de estudo o estado da Bahia, no nordeste do Brasil. Iniciativas de estudos hidrogeológicos em algumas regiões do estado da Bahia foram promovidas pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), e diagnósticos de bacias hidrográficas, foram patrocinados por órgãos públicos incluindo-se estudos hidrogeológicos, o que possibilitou uma evolução do conhecimento hidrogeológico no estado da Bahia. Tais estudos de bacias foram embasados em dados secundários gerados por empresas de perfuração de poços tubulares principalmente a CERB (NEGRÃO, 2008).

Entende-se como domínio hidrogeológico um grupo de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas, tendo como base principalmente as características litológicas das rochas (BOMFIM, 2010).

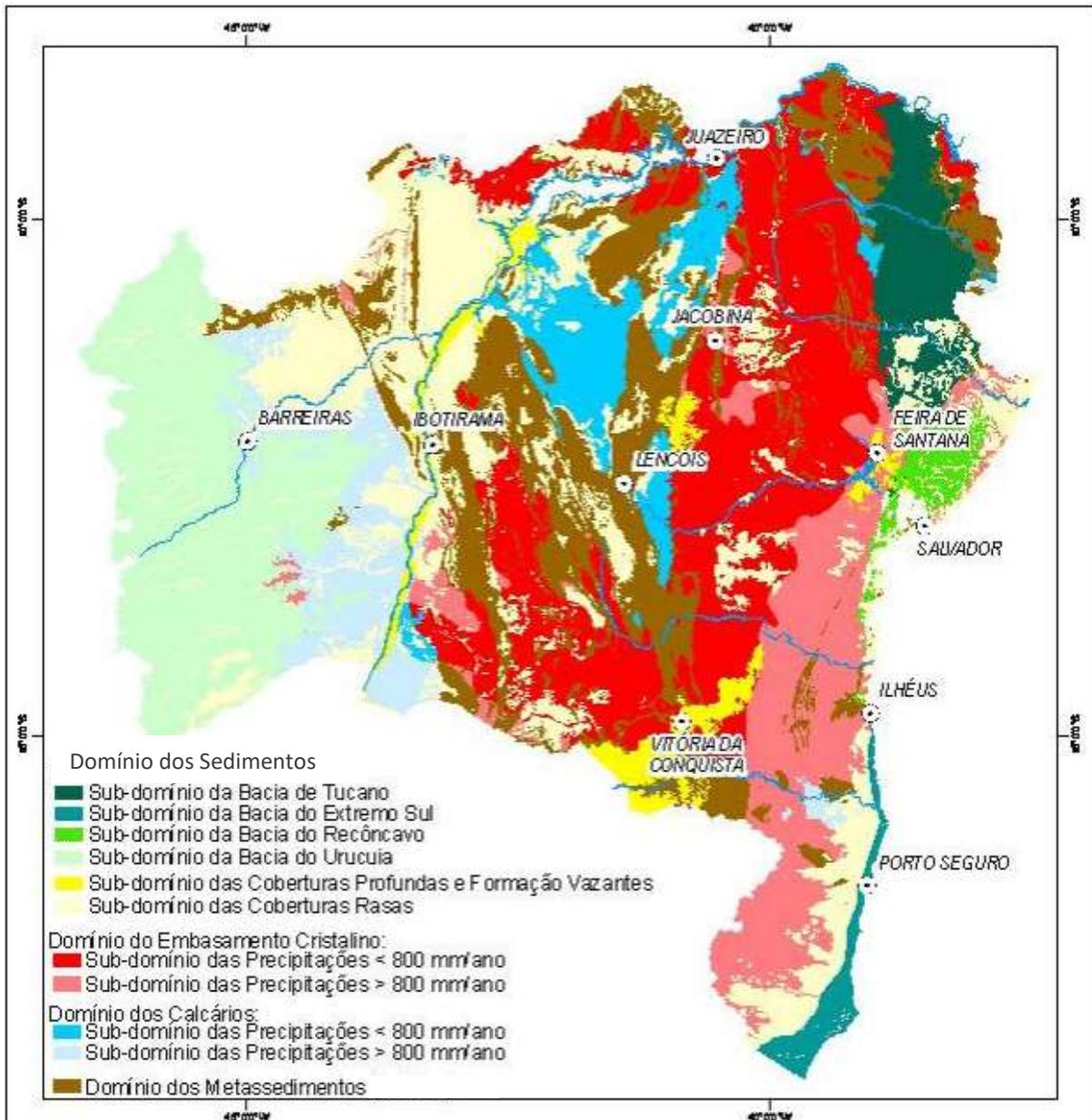
4.1. Domínios Hidrogeológicos do Estado da Bahia

Neste trabalho foram adotadas definições de domínios hidrogeológicos correspondentes aos domínios aquíferos definidos por Guerra & Negrão (1996): são extensas áreas que, a despeito da diversidade das suas características geológicas, apresentam comportamento hidrogeológico semelhante. No estado da Bahia estão divididos em cinco os domínios aquíferos: coberturas detríticas, bacias sedimentares, metassedimentos, calcários e embasamento cristalino, como pode ser observado na Figura 6.

Portanto, cada domínio caracteriza-se pela capacidade de produção de seus poços e pela qualidade natural de suas águas (OLIVEIRA, *et. al.*, 2007).

Para este trabalho, os domínios aquíferos das coberturas detríticas e das bacias sedimentares foram agrupados em apenas um, por apresentarem comportamento hidrogeológico semelhante: domínio das rochas sedimentares. Portanto, os quatro domínios hidrogeológicos definidos neste trabalho são: domínio das rochas cristalinas, domínio das rochas metassedimentares, domínio das rochas calcárias e domínio das rochas sedimentares.

Figura 6 – Mapa dos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia.



Fonte: Oliveira, et. al. (2007).

4.1.1. Domínio das rochas cristalinas

O domínio das rochas cristalinas ocupa um total correspondente a 201.600 km² ou 36% da área do estado. O aquífero cristalino é constituído essencialmente, por granitos, gnaisses, migmatitos e granulitos, formando aquífero de natureza fissural, tendo como característica fundamental sua baixa capacidade de armazenamento e o elevado índice de salinização de suas águas, especialmente quando submetidas a condições climáticas cujas precipitações pluviométricas são inferiores a 800 mm por ano (NEGRÃO, 2008).

Ainda assim, esse aquífero possui importância nas zonas rurais da Bahia, atendendo principalmente à dessedentação animal e uso doméstico e, em menor quantidade, ao consumo humano através dos poucos poços produtores de água doce ou via processo de dessalinização (ANDRADE, 2010).

4.1.2. Domínio das rochas metassedimentares

Ocupam aproximadamente 15% (84.300 km²) da área do estado. Os metassedimentos formam aquíferos livres de natureza fissural e fraturada, similarmente aos aquíferos cristalinos. Diferenciam-se destes, entretanto, por vazões mais elevadas e por menor salinização de suas águas, em parte, devido à sua composição litológica rica em quartzo e, por ocorrerem em regiões de topografia e pluviosidade elevadas, com precipitações pluviométricas acima de 800 mm/ano (OLIVEIRA, *et al.*, 2007).

4.1.3. Domínio das rochas calcárias

O domínio das rochas calcárias ocupa aproximadamente 14% da área do Estado (77.900 km²). Esse domínio é composto por aquíferos de elevada heterogeneidade e anisotropia, livres e com capacidade de armazenar consideráveis volumes de água, a depender fundamentalmente do regime pluviométrico da região. No estado da Bahia, esse domínio é dividido em regiões que recebem chuvas médias anuais inferiores a 800 mm e outras áreas menores, de pluviometria superior a 800 mm/ano (GUERRA & NEGRÃO, 1996).

4.1.4. Domínio das rochas sedimentares

O domínio das rochas sedimentares ocupa uma área de aproximadamente 111.600 km², correspondendo a 20% da área do estado da Bahia, onde ocorrem formações geológicas de grande porte e condições de porosidade adequadas para armazenarem grandes reservas de águas subterrâneas (NEGRÃO, 2010; RIBEIRO, 2013). Apesar da grande potencialidade destes aquíferos, localmente, podem apresentar baixas vazões, como reflexo da grande heterogeneidade, do ponto de vista estratigráfico, litológico e estrutural (MESTRINHO, *et al.*, 2006).

Encontra-se nesse domínio o sistema aquífero superior São Sebastião/Marizal, que possui excelente qualidade química e grande capacidade de produção dos poços perfurados. Por isso, suas águas vêm sendo exploradas em larga escala, havendo poços tubulares com 450 m de profundidade e com vazões superiores a 350 m³/h (CARMO, 2016).

A Bacia Sedimentar do Tucano possui grande extensão territorial e excelentes condições de armazenamento, tornando-a uma das maiores reservas de água subterrânea do estado da Bahia (CARMO, 2016).

Também fazem parte desse domínio as coberturas detríticas, sendo que as coberturas rasas são depósitos detríticos formados pelas areias de dunas, aluviões e outros, de pequenas espessuras (CARMO, 2016).

4.2. Pluviosidade no Estado da Bahia

Segundo a classificação Thornthwhite, existem cinco tipos de climas básicos no estado da Bahia: úmido, úmido a subúmido, subúmido a seco, semiárido e árido.

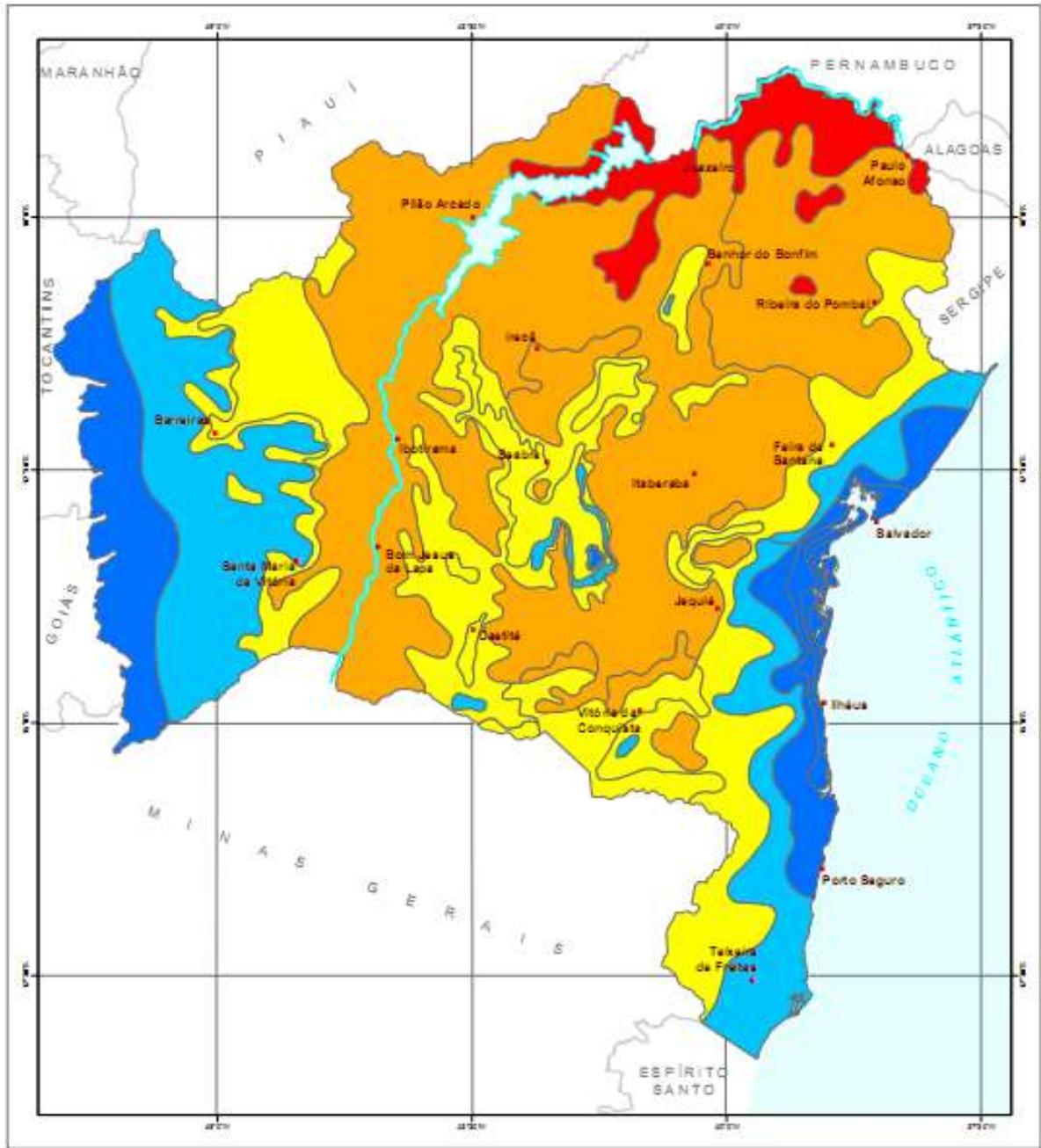
O clima úmido é encontrado tanto no limite oeste do Estado com chuvas médias anuais variando de 1.300 a 1.600 mm, como na maior parte do litoral, onde as chuvas variam de 1.400 a 2.600 mm anuais (CARMO, 2016).

O clima úmido a subúmido é encontrado em faixas contíguas às do clima úmido, onde o índice pluviométrico oscila entre 1.000 mm e 1.400 mm. Já o clima subúmido a seco apresenta-se paralelo à faixa atlântica, com precipitação média anual variando de 800 a 1.200 mm (CARMO, 2016).

O clima semiárido ocorre em praticamente 70% do estado da Bahia. Apresenta precipitações inferiores a 800 mm anuais, alcançando valores abaixo de 600 mm em algumas regiões. O clima árido é encontrado no extremo norte do Estado, com precipitações oscilando entre 300 e 500 mm, concentradas em apenas três meses.

A Figura 7 apresenta as faixas de climas no território do estado da Bahia.

Figura 7 – Mapa dos tipos de climas do estado da Bahia



TIPOS CLIMÁTICOS

- Úmido
- Úmido a Subúmido
- Subúmido a Seco
- Semiárido
- Árido



Topologia Climática de Transição S/Malter: Pluviometria 1943-1993, Temperatura 1961-1990. ISEL BAHIA, 1998

Fonte: Carmo (2016) adaptado de Bahia (2003).

4.3. Geologia no Estado da Bahia

A geologia do estado da Bahia foi estudada através do Mapa de Geodiversidade do Estado da Bahia, fruto do Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade, elaborado pela CPRM, em 2010. O produto compartimenta o território baiano em unidades geológico-ambientais, considerando-se a constituição litológica da supraestrutura e da infraestrutura geológica, conforme o Quadro 6.

Esses domínios geológicos – ambientais, apresentados no Quadro 6, serão utilizados na correlação com os resultados da especiação do sulfato, para as 289 amostras enriquecidas em sulfato. Nessa parte da correlação serão abordadas e consideradas apenas as unidades de interesse na correlação, ou seja, onde os poços estiverem inseridos.

Quadro 6 – Unidades geológico - ambientais do território brasileiro

Domínio Geológico - Ambiental	Código UNIGEO	Caracterização da Unidade Geológico-Ambiental
Sedimentos cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso	DCa	Ambiente de planície aluvionar recente. Material inconsolidado, de espessura variável. Da base para o topo é formado por cascalho, areia e argila.
	DCta	Ambiente de terraços aluvionares. Material inconsolidado a semiconsolidado, de espessura variável. Da base para o topo, é formado por cascalho, areia e argila.
	DCfl	Ambiente flúvio - lacustre. Predomínio de argilas intercaladas com finas camadas de areia.
	DCmc	Ambiente marinho costeiro. Predomínio de sedimentos arenosos.
	DCm	Ambiente misto (Marinho/Continental). Intercalações irregulares de sedimentos arenosos, argilosos, em geral ricos em matéria orgânica (mangues e brejos).
Sedimentos indiferenciados cenozóicos relacionados a retrabalhamento de outras rochas, geralmente associados a superfícies de aplainamento	DCSR	Relacionado a sedimentos retrabalhados de outras Rochas. Coberturas areno-conglomeráticas e/ou siltico argilosas associadas a superfícies de aplainamento.
Sedimentos cenozoicos bioclásticos	DCBr	Plataforma continental – recifes.
Sedimentos cenozoicos eólicos	DCEm	Dunas móveis – Material arenoso inconsolidado.
	DCEf	Dunas fixas – Material arenoso fixado pela vegetação.
Coberturas cenozoicas detrítico-lateríticas	DCDL	Depósitos detrítico-lateríticos – Provenientes de processos de lateritização em rochas de composições diversas sem a presença de crosta.

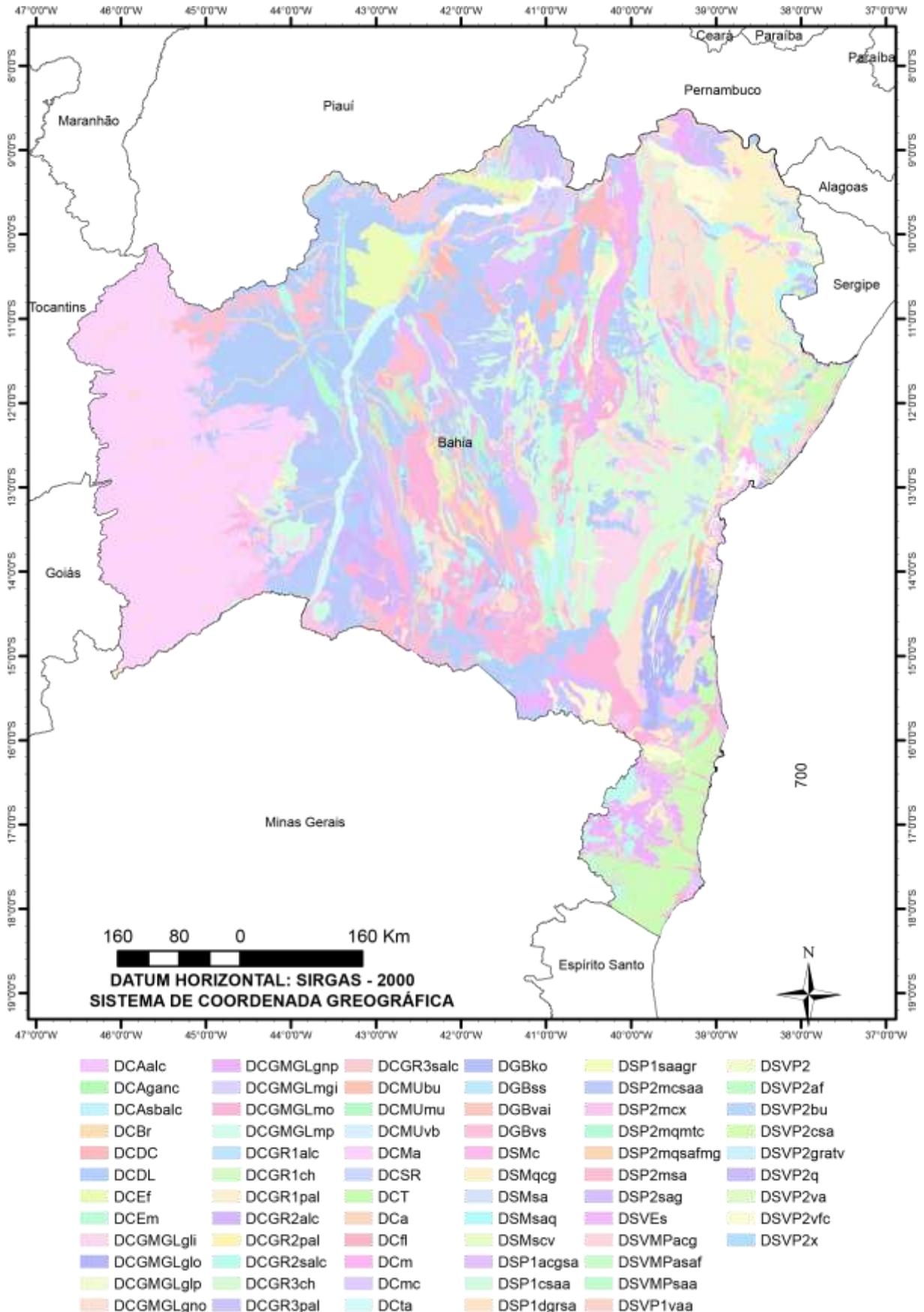
Domínio Geológico - Ambiental	Código UNIGEO	Caracterização da Unidade Geológico-Ambiental
Coberturas cenozoicas detrítico-carbonáticas	DCDC	Depósitos detrítico-carbonáticos – Provenientes de processos de lateritização em rochas carbonáticas.
Sedimentos cenozoicos pouco a moderadamente consolidados associados a tabuleiros	DCT	Alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (arenito, siltito, argilito e cascalho).
Sedimentos cenozoicos e mesozoicos pouco a moderadamente consolidados associados a profundas e extensas bacias continentais	DCMa	Predomínio de sedimentos arenosos de deposição continental, lacustre, fluvial ou eólica – arenitos.
Sequências sedimentares mesozoicas clasto-carbonáticas consolidadas em bacias de margem continentais (rift)	DSMc	Predomínio de calcário e sedimentos síltico-argilosos.
	DSMqcg	Predomínio de sedimentos quartzo-arenosos e conglomeráticos, com intercalações de sedimentos síltico-argilosos e/ou calcíferos.
	DSMaq	Intercalações de sedimentos síltico-argilosos e quartzo-arenosos.
	DSMscv	Intercalação de sedimentos síltico-argilosos e camadas de carvão.
	DSMsa	Predomínio de sedimentos síltico-argilosos, com alternância de sedimentos arenosos e conglomeráticos.
Coberturas sedimentares e Vulcano-sedimentares mesozoicas e paleozoicas pouco a moderadamente consolidadas, associadas a grandes e profundas bacias sedimentares do tipo sinéclise	DSVMPasaf	Intercalações de sedimentos arenosos, síltico-argilosos e folhelhos.
	DSVMPacg	Predomínio de arenitos e conglomerados.
	DSVMPsaa	Predomínio de sedimentos síltico-argilosos com intercalações arenosas.
Complexos alcalinos intrusivos e extrusivos, diferenciados do terciário, Mesozóico e Proterozóico	DCAsbalc	Série subalcalina (monzonitos, quartzomonzonitos, mangeritos etc.).
	DCAalc	Série alcalina saturada e alcalina subsaturada (sienito, quartzossienitos, traquitos, nefelina sienito, sodalita sienito etc.).
	DCAganc	Gabro, anortosito, carbonatito, dique de lamprófiro.
Sequências sedimentares e Vulcano-sedimentares do Eopaleozóico associadas a rifts, não ou pouco deformadas e metamorfisadas	DSVEs	Predomínio de rochas sedimentares.
Coberturas sedimentares proterozóicas, não ou muito pouco dobradas e metamorfisadas, caracterizadas por um empilhamento de camadas horizontalizadas e sub-horizontalizadas de várias espessuras, de sedimentos clasto-químicos de várias composições, associados aos mais diferentes ambientes tectono-deposicionais.	DSP1acgsa	Predomínio de sedimentos arenosos e conglomeráticos, com intercalações subordinadas de sedimentos síltico-argilosos.
	DSP1saagr	Predomínio de sedimentos síltico-argilosos, com intercalações subordinadas de arenitos e grauvacas.
	DSP1csaa	Rochas calcárias com intercalações subordinadas de sedimentos síltico-argilosos e arenosos.
	DSP1dgrsa	Diamictitos, metarenitos feldspáticos, sedimentos arenosos e síltico-argilosos.

Domínio Geológico - Ambiental	Código UNIGEO	Caracterização da Unidade Geológico-Ambiental
Sequências vulcanossedimentares proterozóicas, não ou pouco dobradas e metamorfisadas	DSVP1va	Predomínio de vulcanismo ácido a intermediário.
	DSVP1vaa	Vulcanismo ácido a intermediário e intercalações de metassedimentos arenosos e siltico-argilosos e formações ferríferas e/ou manganíferas.
Sequências sedimentares proterozóicas dobradas, metamorfisadas de baixo a médio grau	DSP2mqmtc	Metarenitos, quartzitos e metaconglomerados.
	DSP2mqsafmg	Predomínio de metarenitos e quartzitos, com intercalações irregulares de metassedimentos siltico-argilosos e formações ferríferas ou manganíferas.
	DSP2msa	Intercalações irregulares de metassedimentos arenosos e siltico-argilosos.
	DSP2sag	Predomínio de metassedimentos siltico-argilosos, com intercalações de meta-grauvacas
	DSP2mcx	Intercalações irregulares de metassedimentos arenosos, metacalcários, calcossilicáticas e xistos calcíferos.
	DSP2mcsaa	Predomínio de metacalcários, com intercalações subordinadas de metassedimentos siltico-argilosos e arenosos.
Sequências vulcanossedimentares proterozóicas dobradas metamorfisadas de baixo a alto grau	DSVP2in	Indiferenciado.
	DSVP2q	Predomínio de quartzitos.
	DSVP2x	Predomínio de metassedimentos siltico-argilosos, representados por xistos.
	DSVP2csa	Predomínio de rochas metacalcárias, com intercalações de finas camadas de metassedimentos siltico-argilosos.
	DSVP2vfc	Metacherts, metavulcânicas, formações ferríferas e/ou formações manganíferas, metacalcários, metassedimentos arenosos e siltico-argilosos.
	DSVP2gratv	Metagrauvas, metarenitos, tufos e metavulcânicas básicas a intermediárias.
	DSVP2bu	Predomínio de rochas metabásicas e metaultramáficas.
	DSVP2af	Metacherts, metarenitos, metapelitos e formações ferríferas.
	DSVP2va	Predomínio de vulcânicas ácidas.
Sequências vulcanossedimentares tipo <i>Greenstone Belt</i> , Arqueano ao Mesoproterozóico	DGBko	Sequência vulcânica komatiítica associada a talcoxistos, anfibolitos, cherts, formações ferríferas e metaultrabasitas.
	DGBss	Predomínio de sequência sedimentar.
	DGBvai	Sequência vulcanossedimentar, com alta participação de metavulcânicas ácidas e intermediárias.
	DGBvs	Sequência vulcanossedimentar.
Corpos máfico-ultramáficos (suítes komatiíticas, suítes toleíticas, complexos bandados)	DCMUmu	Série máfico-ultramáfica (dunito, peridotito etc.).
	DCMUbu	Série máfica (gabro, anortosito etc.).
	DCMUvb	Vulcânicas básicas.
Complexos granitoides não deformados	DCGR1ch	Charnockitóides
	DCGR1alc	Séries graníticas alcalinas.

Domínio Geológico - Ambiental	Código UNIGEO	Caracterização da Unidade Geológico-Ambiental
Complexos granitoides não deformados	DCGR1salc	Séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto-K)
	DCGR1pal	Granitoides peraluminosos.
Complexos granitoides deformados	DCGR2alc	Séries graníticas alcalinas.
	DCGR2salc	Séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto-K)
	DCGR2pal	Granitoides peraluminosos.
Complexos granitoides intensamente deformados: ortognaisses	DCGR3ch	Charnockitóides
	DCGR3salc	Séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto-K)
	DCGR3pal	Granitoides peraluminosos.
Complexo granito-gnaissе-migmatítico e granulitos	DCGMGLmo	Predominam migmatitos ortoderivados.
	DCGMGLmp	Predominam gnaisses paraderivados.
	DCGMGLgnp	Predomínio de gnaisses paraderivados. Podem ou não conter porções migmatíticas.
	DCGMGLmgi	Migmatitos indiferenciados.
	DCGMGLglp	Gnaissе-granulito paraderivado. Podem ou não conter porções migmatíticas.
	DCGMGLglo	Gnaisses granulíticos ortoderivados. Podem ou não conter porções migmatíticas.
	DCGMGLgli	Granulitos indiferenciados.
	DCGMGLgno	Predomínio de gnaisses ortoderivados. Podem ou não conter porções migmatíticas.

Fonte: O autor, adaptado de CPRM (2010).

Figura 8 – Mapa de geodiversidade do estado da Bahia



Fonte: O autor, adaptado de CPRM (2010).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

O levantamento dos poços tubulares foi realizado utilizando o Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB, com o cadastro de poços tubulares construídos diretamente pela CERB e por empresas contratadas, mas sob a sua fiscalização.

O Banco de Dados serviu como base para o levantamento dos dados necessários para estudar a especiação química do sulfato nas águas subterrâneas, nos diversos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia.

Os dados estavam organizados em planilhas eletrônicas no ambiente Microsoft Excel®, o que facilitou o tratamento e análise, sendo que o cadastro dos poços possuía informações a respeito de:

- número de cadastro CERB;
- município;
- localidade;
- coordenadas;
- data da perfuração;
- data do teste de bombeamento;
- profundidade;
- nível estático;
- nível dinâmico;
- vazão do teste de bombeamento;
- vazão de perfuração;
- data da coleta;
- data da análise;
- laboratório;
- tipo de rocha;
- além dos 21 parâmetros físicos e químicos.

Uma imagem da planilha eletrônica em Microsoft Excel® pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – Imagem da planilha eletrônica com dados de análises físico-químicas e químicas das águas subterrâneas do estado da Bahia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Nº CORPORE	Nº CERB	Município	Localidade	Coord N-S (° ' ")	Coord E-O (° ' ")	Data Perf	Data TB	PROF (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão TB (m³/h)	Vazão Perf (m³/h)	Data Coleta	Data Análise	Laboratório	Resíduo total (mg/l)	Cloreto (mg/l Cl)	Dureza (mg/l CaCO ₃)
2	15782	1_7732	ITUBERÁ	BARRA DO S	135034,9	390036,7	13/03/2004	4/03/200	238	-0,00	44,19	39,6	50	12/04/2011	20/04/2011	UFBA	534,00	176,00	115,00
3	17338	1_8633	ABAÍRA	MALHADA V	131731,2	413610,0	01/05/2007	4/05/200	100	14,00	76,15	1,61	1,63	14/05/2007	28/05/2007	UFBA	786,00	182,00	435,00
4	17429	1_8691	BOTUPORÃ	MARROÁZ I	132107,8	423045,6	10/09/2007	7/09/200	80	4,08	42,94	3,02	4,5	27/09/2007	26/10/2007	UFBA	1986,00	787,00	805,00
5	17486	1_8698	PEDRO ALEX	SEDE I	095951,8	375414,5	16/09/2007	6/09/200	80	1,25	38,93	10,42		16/09/2007	03/10/2007	UFBA	13090,00	5823,00	3266,00
6	17469	1_8710	CAETITÉ	VILÃO I	135441,5	422137,0	01/10/2007	5/10/200	80	5,66	31,22	12,37	9	15/10/2007	08/11/2007	UFBA	178,00	59,00	40,90
7	17482	1_8711	MALHADA D	CAROBA I	142113,4	415401,0	01/10/2007	3/11/200	70	1,34	50,87	3,7	6,65	03/11/2007	22/11/2007	UFBA	1072,00	298,00	394,00
8	17450	1_8732	PARATINGA	RIACHO DOS	124710,6	431222,8	01/11/2007	1/11/200	40	8,39	29,77	6,88		01/11/2007	23/11/2007	UFBA	320,00	4,03	164,00
9	17585	1_8744	MUQUÉM D	PROCOPIO	122528,1	432459,7	12/11/2007	3/11/200	150	6,10	91,99	2,56	2	11/11/2009	18/12/2009	UFBA	422,00	39,20	284,00

	A	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	J
1	Nº	Nitrato	Alcal HCO ₃	Alcal CO ₃	Alcal OH	Cálcio	Condutividade	Cor	Ferro	Fluoreto	Magnésio	Nitrito	PH	Sílica	Sulfato	Turbidez	Acidez	Potássio	Sódio	ROCHA	
2	CORPORE	(mg/l N-NO ₃)	(mg/l CaCO ₃)	(µS/cm)	(mg/l Pt-Co)	(mg/l Fe)	(mg/l F)	(mg/l Mg)	(mg/l N-NO ₂)		(mg/l SiO ₂)	(mg/l SO ₄)	(NTU)	(mg/l CaCO ₃)	(mg/l)	(mg/l)					
3	15782	0,14	191,00	0,00	0,00	75,20	996,00	25,00	0,28	0,22	9,67	0,08	8,02	14,90	33	2,81	0,00	2,00	165,00	SEDIMENTAR	
4	17338	8,29	300,00	0,00	0,00	362,00	1387,00	0,00	0,09	0,80	17,70	0,01	8,09	56,90	10,4	3,71	ND	5,00	100,00	CRISTALINO	
5	17429	2,22	211,00	0,00	0,00	503,00	2870,00	40,00	0,57	0,33	73,40	0,03	8,10	64,35	31,3	32,50	0,00	15,00	237,00	CRISTALINO	
6	17486	5,48	585,00	0,00	0,00	936,00	16100,00	5,00	0,26	1,45	566,00	0,02	7,02	31,00	34,6	2,16	17,30	25,00	2900,00	CRISTALINO	
7	17469	3,55	30,10	0,00	0,00	19,90	352,00	5,00	0,08	0,22	5,11	0,01	7,34	93,30	3,94	3,72	4,96	8,00	36,00	CRISTALINO	
8	17482	25,50	187,00	8,42	0,00	227,00	1501,00	140,00	0,42	0,55	40,60	0,01	8,31	87,30	50,7	72,60	0,00	17,00	162,00	CRISTALINO	
9	17450	0,59	237,00	0,00	0,00	88,80	481,00	20,00	0,16	0,52	18,30	0,01	7,95	26,10	19,5	10,50	3,01	10,00	40,50	META-SEDIM	
10	17585	7,00	206,00	4,08	0,00	234,00	668,00	58,00	1,11	1,48	12,10	0,00	8,30	23,00	33,6	15,20	0,00	9,00	17,00	CALCÁRIO	

Fonte: O autor.

5.2. Metodologia do trabalho

Para o desenvolvimento do trabalho foram delimitadas as seguintes etapas:

5.2.1. Revisão bibliográfica

O trabalho iniciou-se através de pesquisa bibliográfica para revisão de conceitos nas linhas de interesse para esta pesquisa e caracterização da área de estudo, tendo como palavras-chave: sulfato, águas subterrâneas, qualidade de águas subterrâneas, especiação química e domínios hidrogeológicos do estado da Bahia.

Foram pesquisados artigos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, livros, legislações, sites, workshops, entre outros materiais, que quanto ao período variaram de 1973 a 2016.

A maior parte do material levantado referente ao estudo do sulfato em águas subterrâneas é de origem estrangeira, os quais tinham como foco a determinação da origem do sulfato nas águas subterrâneas, utilizando técnicas isotópicas para identificação. Alguns trabalhos nessa linha são: Fisher & Mullican (1997), Xiaoping, *et. al.* (2000), Bölke (2002), Hudak & Sanmanee (2003), Kaown *et. al.* (2009), Horst, *et. al.* (2011), Liu *et. al.* (2013), Hussain *et. al.* (2015), Mubarak *et. al.* (2015), Bertrand *et. al.* (2016).

5.2.2. Levantamento e tratamento do material a ser analisado

Realizou-se o levantamento de dados secundários de análises físico-químicas e químicas das águas de poços tubulares, constantes no Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB. Eventualmente, foi realizada consulta ao banco de dados da CPRM, através do domínio digital do SIAGAS/RIMAS, a fim de complementar e/ou confirmar alguns dados.

Prosseguiu-se com a avaliação da consistência dos dados das análises físico-químicas e químicas das águas, eliminando os laudos de análises de água que estavam incompletos, ou seja, faltando informação para alguns parâmetros que foram avaliados quanto a sua relação com o sulfato, a fim de reunir a maior quantidade possível de dados.

Após a análise de consistência, obteve-se um total de 2.792 poços para tratamento dos dados. Desse total, somente 289 poços (10,4%) apresentaram concentração do sulfato acima do limite permitido pela legislação, de 250 mg L⁻¹.

Todas as análises realizadas nesse trabalho consideraram o total de 2.792 poços, nos quais está inclusa a amostra de 289 poços enriquecidos em sulfato, exceto a especiação química que foi realizada somente para este último grupo.

5.2.3. Tratamento estatístico dos dados

A etapa inicial do tratamento dos dados consistiu na estatística de dados censurados, ou seja, dados que possuem valores parcialmente conhecidos, abaixo ou acima do limite de detecção do método.

Após a estatística de dados censurados, foi utilizada a estatística descritiva tanto para os 2.792 poços localizados em todos os domínios hidrogeológicos do estado da Bahia, quanto para a amostra dos 289 poços enriquecidos em sulfato, com o objetivo de analisar e interpretar os dados das análises físico-químicas e químicas das amostras de águas subterrâneas selecionadas para estudo.

Para isso, foram obtidas as medidas de tendência central: média, mediana e moda, bem como as medidas de dispersão: desvio padrão, valor máximo e mínimo das amostras, e ainda: erro padrão, variância da amostra, curtose e assimetria. Em seguida, esses dados foram compartimentados em intervalos de classes para a construção de histogramas, a fim de representar a distribuição dos teores de sulfato nas águas subterrâneas.

A seguir, foi feita a análise de correlação bivariada para descrever o relacionamento entre os pares dos parâmetros estudados, por meio da representação via gráfico de dispersão. Foram construídos gráficos de concentração do sulfato versus os seguintes parâmetros físico-químicos e químicos: cor aparente, turbidez, pH, sólidos totais dissolvidos, dureza total, magnésio, cálcio, cloreto, ferro, fluoreto, condutividade elétrica, nitrito, nitrato, alcalinidade total, sódio, potássio, acidez e sílica.

Ainda como parte da análise de correlação bivariada, quando a análise envolve um grande número de variáveis é indicada a utilização de matrizes de correlação. Neste

trabalho, foram utilizadas técnicas paramétricas (Pearson) e não paramétricas (Spearman) para avaliar a correlação entre duas variáveis quantitativas.

5.2.4. Estudo da caracterização química das águas subterrâneas do estado da Bahia

Foram construídos diagramas triangulares de PIPER, através do software Qualigraf®, com os dados da CERB e SIAGAS/CPRM. Os diagramas de PIPER são utilizados para a caracterização química e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), conforme pode ser verificado na Figura 11, que mostra um exemplo de um diagrama de PIPER.

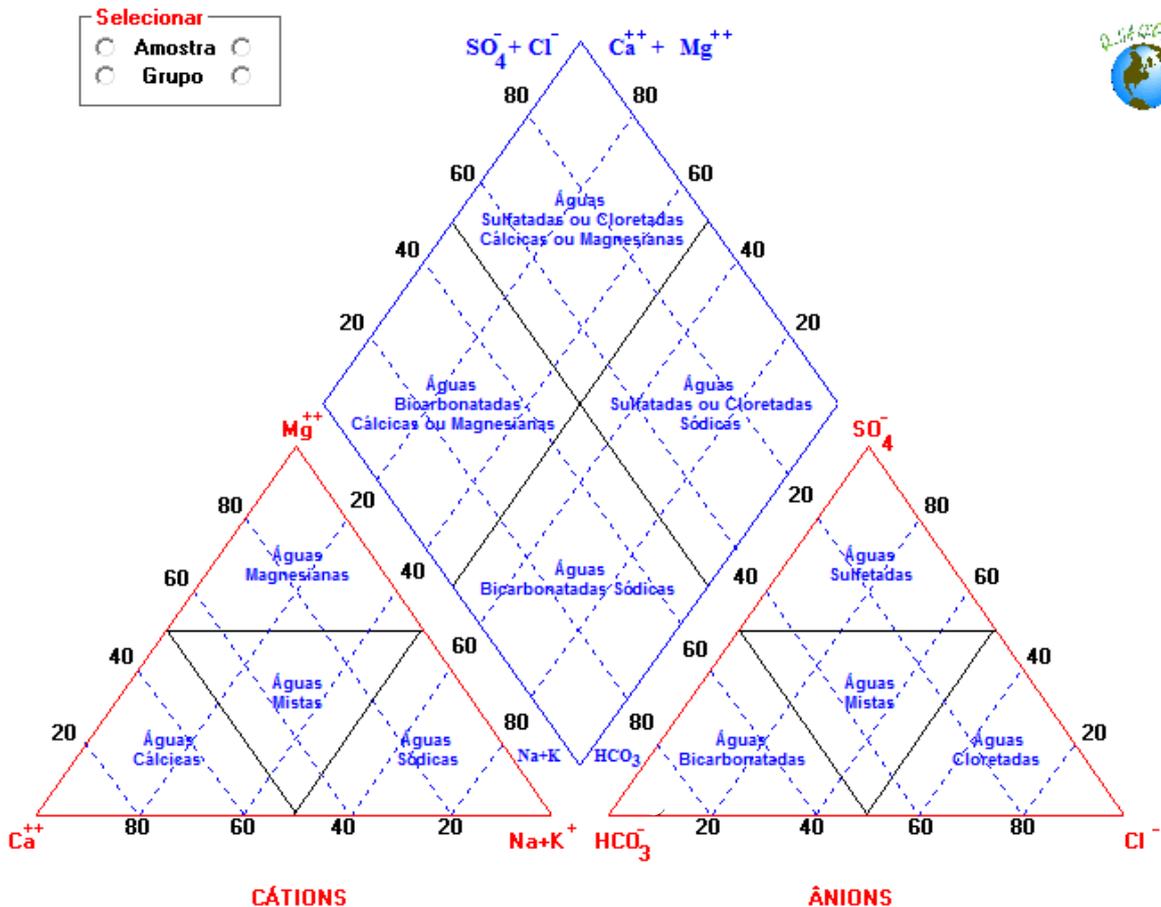
O software Qualigraf®, cuja interface inicial é apresentada na Figura 10, é uma ferramenta desenvolvida com a finalidade de auxiliar na parte gráfica das análises mais usuais de qualidade de amostras d'água, possibilitando a construção de diagramas triangulares de PIPER, como o exemplo apresentado na Figura 11, entre outras aplicações que podem ser realizadas com esse software. O Qualigraf® foi desenvolvido no ano de 2001 no Departamento de Recursos Hídricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, sendo um software livre, à disposição do público, através do site da FUNCEME, com última versão atualizada em 2014.

Figura 10 – Foto da interface do software Qualigraf®



Fonte: O autor.

Figura 11 – Diagrama triangular de PIPER e a classificação das águas quanto aos íons dominantes



Fonte: O autor

Como a amostra estudada possui um grande número de dados (2.792 poços), por uma questão de limitação do software Qualigraf, que só consegue trabalhar com no máximo 499 amostras por vez, foi necessário dividir o universo amostral.

Essa divisão utilizou como base a subdivisão nos domínios hidrogeológicos, aplicada por Carmo (2016) em seu trabalho intitulado: “Ferro na Água Subterrânea do Estado da Bahia: uma avaliação preliminar dos fatores influentes na concentração”. O objetivo foi que, utilizando a mesma divisão em domínios hidrogeológicos, pudesse auxiliar em futuras comparações de dados que possam se fazer necessárias.

Portanto, a análise das características hidroquímicas, através da construção dos diagramas de Piper, foi realizada nos diferentes tipos de domínios hidrogeológicos, da seguinte forma: cristalino (centro-norte, centro-sul e sudeste), calcário (Irecê e oeste), sedimentar (litoral sul, Recôncavo-Camamu, Tucano, Urucuia) e metassedimentar (leste e oeste), que será apresentado a seguir.

componente químico no *Tableau*, conforme a Figura 13. É possível ainda, definir o pH, se o sistema é aberto ou fechado para a atmosfera, e as configurações redox.

Figura 13 – Interface do *Tableau* no software Mineql +®

Name	H2O	H(+)	Ca(2+)	Log K	Delta H
OH- (-1)	1	-1	0	-13.998	13.345
CaOH+ (+1)	1	-1	1	-12.598	14.535
CaHCO3+ (+1)	0	1	1	11.380	1.7900
CaHPO4 AO	0	1	1	15.085	-0.23000
H2CO3 AO	0	2	0	16.681	-2.2470
HCO3- (-1)	0	1	0	10.330	-3.6170
H2PO4- (-1)	0	2	0	19.553	-4.5200
HPO4-2 (-2)	0	1	0	12.346	-3.5300
H3PO4	0	3	0	21.710	0.0000
CaCO3 AO	0	0	1	3.1500	4.0300
Total Conc. (M) ->	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00		

Fonte: O autor.

O Mineql +® exibe um módulo de espécies do *Tableau*, como apresentado na Figura 14. As espécies tipo I são as espécies químicas dissolvidas mais simples. As espécies tipo II são complexos dissolvidos que consistem em dois ou mais componentes (HCl, NaOH, HCO_3^- , por exemplo) e incluem-se nessa categoria as espécies que o software chama de aquosas. As espécies tipo III, entidades fixas, são a categoria final de espécies químicas que estão presentes em uma concentração conhecida. As espécies tipo IV são os sólidos precipitados que podem voltar a dissolver se as concentrações na solução forem suficientemente baixas. As espécies tipo V são os sólidos dissolvidos com potencial para precipitar, mas que não precipitaram, pois estão presentes em concentração abaixo do seu limite de solubilidade. As espécies tipo VI são espécies que não são consideradas no cálculo.

Figura 14 – Módulo de espécies do *Tableau* exibido no software Mineql +®

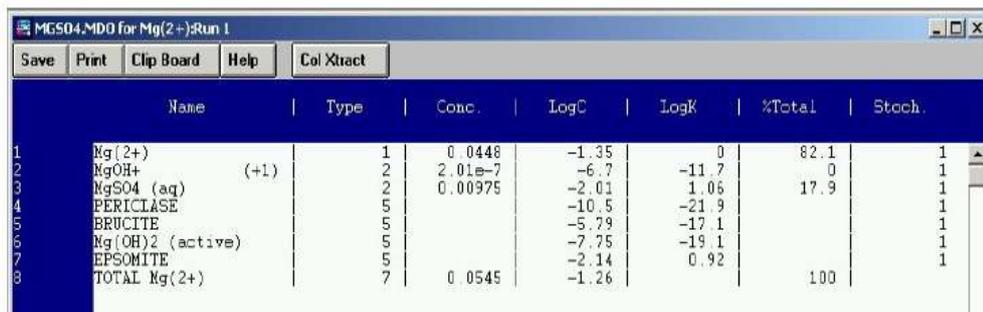
Species Type	Category
I	Free, Aquo, or Unassociated
II	Dissolved Complexes
III	Fixed Entities: e.g., Solids, gases, pH
IV	Precipitated Solids
V	Dissolved Solids: Solids with the potential to precipitate
VI	Species Not Considered

Fonte: O autor.

O software Mineql +® fornece três opções de saída de resultado:

- Saída da especiação exibida em um formato tabular (Figura 15):

Figura 15 – Interface da saída da especiação em formato tabular no software Mineql +®

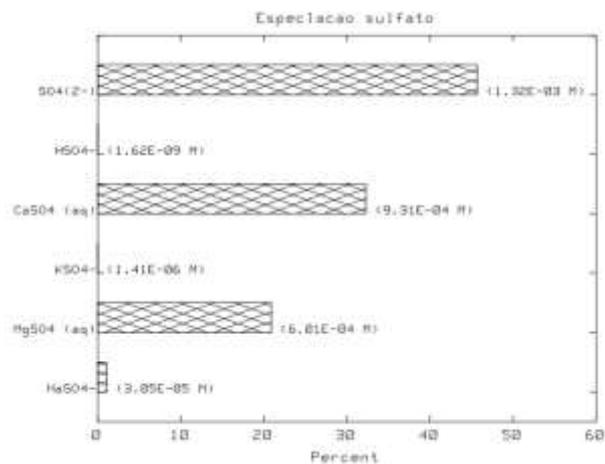


	Name	Type	Conc.	LogC	LogK	%Total	Stoch.
1	Mg(2+)	1	0.0448	-1.35	0	82.1	1
2	MgOH+ (+1)	2	2.01e-7	-6.7	-11.7	0	1
3	MgSO4 (aq)	2	0.00975	-2.01	1.06	17.9	1
4	PERICLASE	5		-10.5	-21.9		1
5	BRUCITE	5		-5.79	-17.1		1
6	Mg(OH)2 (active)	5		-7.75	-19.1		1
7	EPSOMITE	5		-2.14	0.92		1
8	TOTAL Mg(2+)	7	0.0545	-1.26		100	1

Fonte: O autor.

- Saída em formato de gráfico de barras dos dados de especiação (Figura 16):

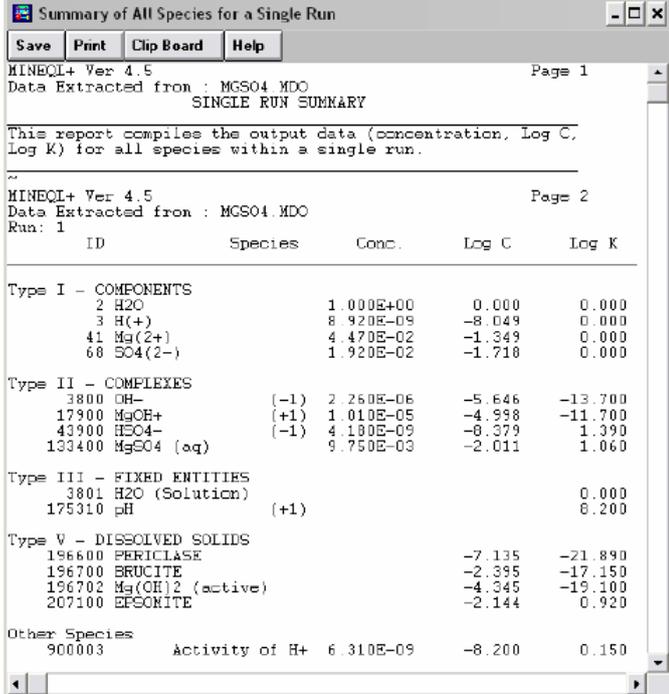
Figura 16 – Interface da saída da especiação em formato de gráfico de barras horizontal realizada no software Mineql +®



Fonte: O autor.

- Saída em formato de relatórios especiais (Figura 17):

Figura 17 – Interface da saída da especiação em formato de relatório realizada no software Mineql +®



Summary of All Species for a Single Run

MINEQL+ Ver 4.5 Page 1
Data Extracted from : MGS04.MDO
SINGLE RUN SUMMARY

This report compiles the output data (concentration, Log C, Log K) for all species within a single run.

MINEQL+ Ver 4.5 Page 2
Data Extracted from : MGS04.MDO
Run: 1

ID	Species	Conc.	Log C	Log K	
Type I - COMPONENTS					
2	H2O	1.000E+00	0.000	0.000	
3	H(+)	8.920E-09	-8.049	0.000	
41	Mg(2+)	4.470E-02	-1.349	0.000	
68	SO4(2-)	1.920E-02	-1.718	0.000	
Type II - COMPLEXES					
3800	OH-	(-)	2.250E-06	-5.646	-13.700
17900	MgOH+	(+)	1.010E-05	-4.998	-11.700
43900	HCO4-	(-)	4.180E-09	-8.379	1.390
133400	MgSO4 (aq)	(-)	9.750E-03	-2.011	1.060
Type III - FIXED ENTITIES					
3801	H2O (Solution)				0.000
175310	pH	(+)			8.200
Type V - DISSOLVED SOLIDS					
196600	PERICLASE		-7.135		-21.890
196700	BRUCITE		-2.395		-17.150
196702	Mg(OH)2 (active)		-4.345		-19.100
207100	EPSOMITE		-2.144		0.920
Other Species					
900003	Activity of H+	6.310E-09	-8.200		0.150

Fonte: O autor.

5.2.6. Confecção de mapas

Foram elaborados mapas temáticos de localização dos poços georreferenciados. Também foram construídos mapas de correlação entre a distribuição dos teores de sulfato com a geologia e pluviosidade confeccionados com o objetivo de apresentar de forma simples e compreensível a distribuição dos teores de sulfato nas águas subterrâneas do estado da Bahia, utilizando o software ArcGis® como ferramenta para elaboração dos mapas.

O ArcGis® compreende um conjunto de aplicativos computacionais de Sistema de Informações Geográficas (SIG) desenvolvido pela empresa norte-americana *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* que fornece ferramentas avançadas para a análise espacial, manipulação de dados e cartografia (SANTOS, *et. al.*, 2014).

As bases de dados espaciais utilizadas foram obtidas através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG);

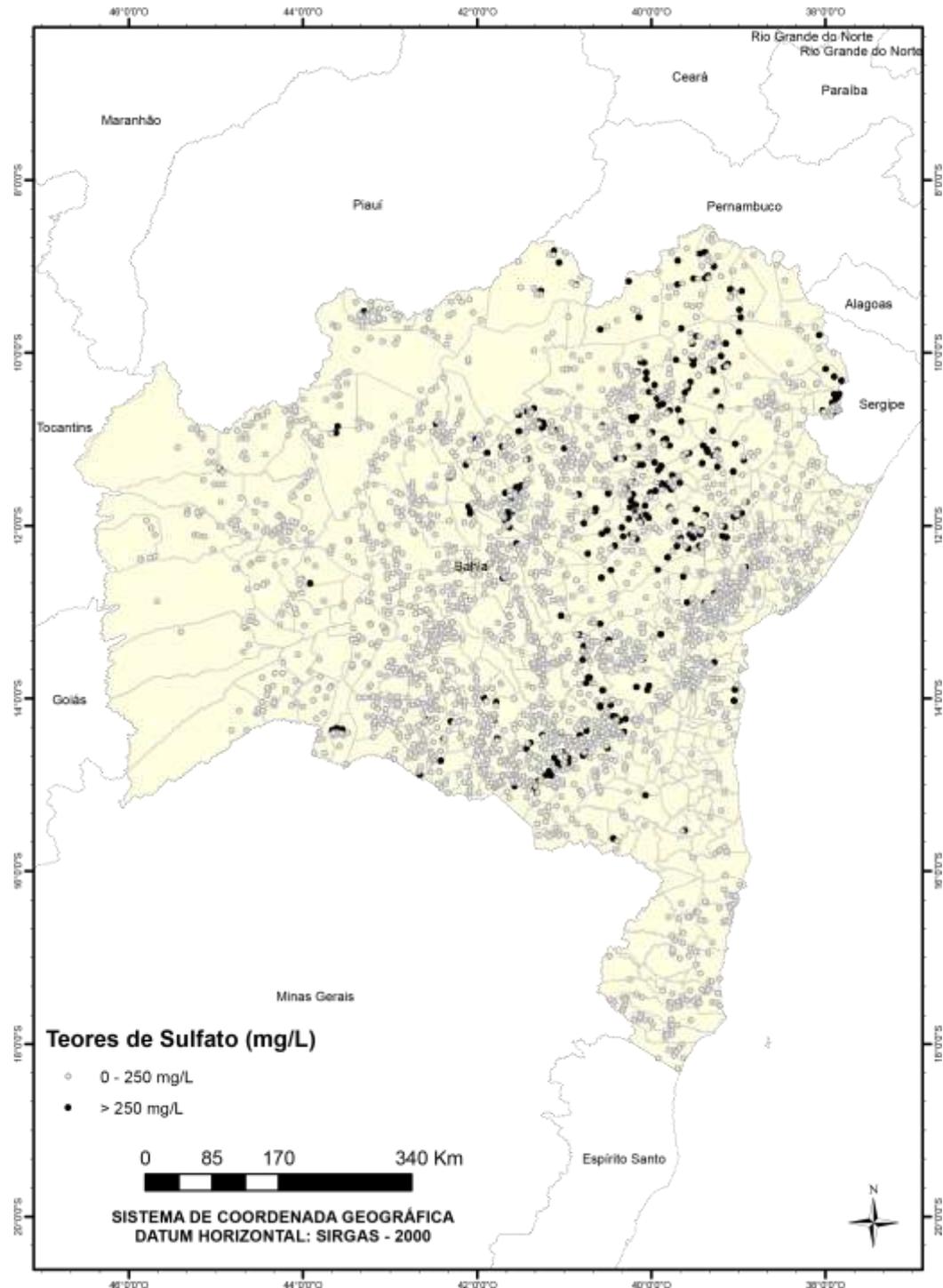
Infraestrutura Nacional de Dados de Satélite (INDE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ou Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). Para a elaboração dos mapas temáticos foi utilizado, além das bases de dados espaciais, o Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB com os 2.792 poços que são objetos de estudo desse trabalho.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Localização dos 2.792 poços no estado da Bahia

Na Figura 18 tem-se a localização dos 2.792 poços analisados neste trabalho.

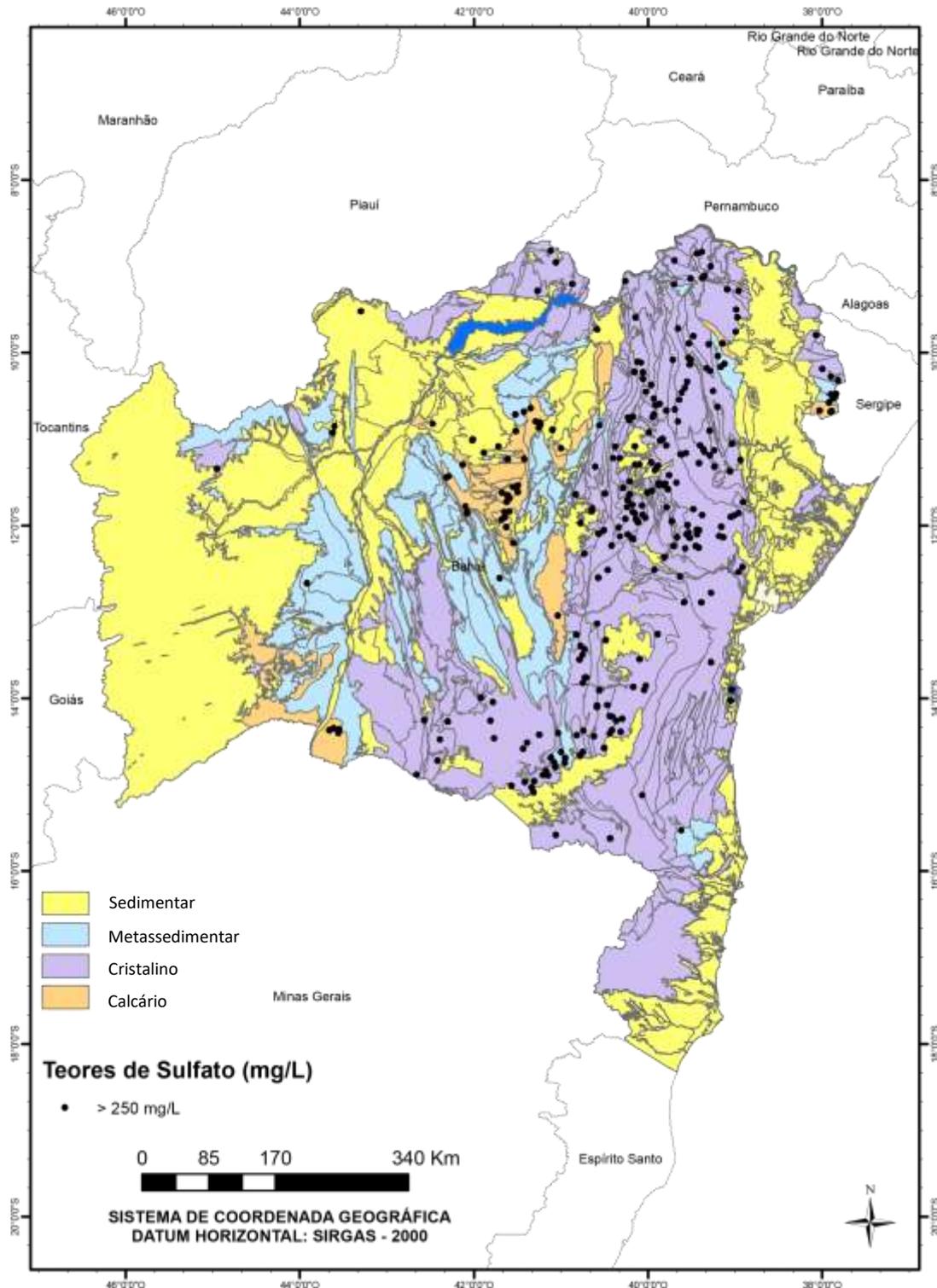
Figura 18 – Mapa de localização dos 2.792 poços, no estado da Bahia.



Fonte: O autor.

Na Figura 19 tem-se a localização dos 289 poços enriquecidos em sulfato nos domínios hidrogeológicos do estado da Bahia, indicando que a maior parte desses poços está no domínio cristalino.

Figura 19 – Mapa de localização dos 289 poços com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹, por domínio hidrogeológico do estado da Bahia.



Fonte: O autor.

6.2. Distribuição dos Teores de Sulfato nas Águas Subterrâneas do Estado da Bahia

De posse dos dados das análises físico-químicas e químicas dos poços perfurados no período de 2003 a 2013 no estado da Bahia, constantes no Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB, e após a análise de consistência dos dados, o primeiro resultado decorre da comparação entre os teores de sulfato nas amostras de águas subterrâneas.

Como ponto de referência, utilizou-se o limite estabelecido pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde (250 mg L^{-1}), e foi verificado que do contingente de 2.792 amostras de águas subterrâneas, 289 amostras apresentaram teores de sulfato acima do referido limite.

A Tabela 1 apresenta dados sobre a quantidade e os percentuais dos 2.792 poços analisados neste trabalho, distribuídos nos diferentes tipos de domínios hidrogeológicos do estado da Bahia.

Tabela 1 - Poços estudados neste trabalho perfurados pela CERB de 2003 a 2013, por domínio hidrogeológico e por teor de sulfato

Domínio Hidrogeológico	Número de poços	% do número de poços	Poços com $\text{SO}_4^{2-} > 250 \text{ mg L}^{-1}$	% de poços com $\text{SO}_4^{2-} > 250 \text{ mg L}^{-1}$	% de poços com $\text{SO}_4^{2-} > 250 \text{ mg L}^{-1}$ por domínio
Cristalino	1.400	50,14%	210	72,66%	15%
Metassedimentar	638	22,85%	26	9,00%	4%
Calcário	404	14,47%	49	16,96%	12%
Sedimentar	350	12,54%	4	1,38%	1%
TOTAL	2.792	100%	289	100%	-

Fonte: O autor.

Conforme a Tabela 1, os 2.792 poços estão majoritariamente localizados no domínio cristalino (50,14%) e, conseqüentemente, este domínio possui o maior percentual (15%) de poços com teores de sulfato acima do limite legislado pela Portaria MS nº 2914/11.

No entanto, apesar de o domínio dos calcários compreender somente 14,47% dos 2.792 poços analisados, esse domínio possui o segundo maior percentual (12%) dos

poços com teor de sulfato acima de 250 mg L⁻¹, enquanto os domínios metassedimentar e sedimentar apresentam, respectivamente 4% e 1%.

De todos os domínios hidrogeológicos, o domínio sedimentar é o único que se mantém na mesma posição percentual (1,38% e 1%), calculado para o total de poços com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹ e calculado em relação ao número total de poços perfurados nesse domínio.

6.3. Tratamento Estatístico dos Dados

6.3.1. Estatística Descritiva

A Tabela 2 contém as médias, medianas, erro padrão, desvio padrão, entre outros parâmetros estatísticos, para os dados dos 19 parâmetros físico-químicos e químicos dos 2.792 poços perfurados, no período de 2003 a 2013, no estado da Bahia, obtidos com o software Microsoft Excel®.

Os parâmetros físico-químicos e químicos analisados foram: resíduo total, dureza, cálcio, sódio, sílica, pH, cloreto, nitrato, condutividade, cor, ferro, fluoreto, magnésio, nitrito, sulfato, turbidez, acidez, potássio e alcalinidade total.

Os teores de sulfato no universo das 2.792 amostras variam entre menor que o limite de detecção do método (LDM) e 3.026 mg L⁻¹, com média de 95,14 mg L⁻¹, erro padrão de 4,01 mg L⁻¹, mediana de 20,60 mg L⁻¹, desvio padrão 211,77 mg L⁻¹ e assimetria de 5,33. Essas informações indicam a grande variabilidade das concentrações de sulfato na água subterrânea do estado da Bahia, com uma assimetria positiva com cauda do lado direito maior que a do lado esquerdo.

No Apêndice A, tem-se a tabela com as médias, medianas, erro padrão, desvio padrão, entre outros parâmetros estatísticos, para as 289 amostras enriquecidas em sulfato, obtidos com o software Microsoft Excel®. Essas amostras possuem uma concentração média de 569,31 mg L⁻¹, erro padrão de 23,291 mg L⁻¹, mediana de 429 mg L⁻¹, desvio padrão 395,98 mg L⁻¹ e assimetria de 2,64. Essas informações indicam a grande variabilidade das concentrações de sulfato na água subterrânea do estado da Bahia, com uma assimetria positiva com cauda do lado direito maior que a do lado esquerdo.

Tabela 2 – Estatística descritiva para as 2.792 amostras de água subterrânea obtida com o software Microsoft Excel®

Parâmetro	Média	Erro Padrão	Mediana	Moda	Desvio Padrão	Curtose	Assimetria	Mínimo	Máximo
Resíduo Total	1855,62	67,17	565,00	416,00	3549,18	23,02	4,11	0,00	37888,00
Dureza	808,08	29,44	284,00	106,00	1555,82	32,75	4,66	0,00	21187,20
Cálcio	136,27	4,18	63,60	1,20	221,05	28,94	4,25	0,00	2845,88
Sódio	215,36	8,72	60,00	20,00	460,57	51,26	5,59	0,00	7860,00
Sílica	45,92	0,49	43,00	30,50	25,88	3,38	1,05	0,07	280,00
pH	7,44	0,01	7,53	8,30	0,70	1,97	-0,99	3,91	9,84
Cloreto	702,73	30,93	96,25	3,00	1634,30	30,06	4,62	0,00	19600,00
Nitrato	4,18	0,20	0,55	0,01	10,68	56,64	6,39	0,00	148,00
Condutividade	2447,26	83,31	882,50	187,00	4402,16	22,46	4,03	7,37	49800,00
Cor	85,83	11,75	5,00	5,00	620,89	1110,42	29,99	0,00	25500,00
Ferro	0,81	0,05	0,13	0,10	2,42	103,17	8,29	0,00	48,50
Fluoreto	0,53	0,01	0,29	0,00	0,76	61,34	5,31	0,00	15,00
Magnésio	114,11	4,88	27,10	10,90	257,92	37,84	5,11	0,00	3411,50
Nitrito	0,03	0,00	0,01	0,00	0,15	254,05	13,43	0,00	3,80
Sulfato	95,14	4,01	20,60	0,00	211,77	41,13	5,33	0,00	3026,00
Turbidez	12,74	0,94	1,97	0,32	49,73	342,80	15,11	0,00	1489,00
Acidez	5,28	0,38	0,55	0,00	19,92	1087,30	28,16	0,00	827,00
Potássio	10,02	0,33	6,00	2,00	17,17	316,98	13,97	0,00	480,00
Alcal. Total	197,28	2,52	190,09	259,00	133,35	0,29	0,58	0,00	957,00

Fonte: O autor.

Com o objetivo de analisar a distribuição dos teores de sulfato, por intervalos de classes de valores das concentrações, no universo das 2.792 amostras de água subterrânea do estado da Bahia estudadas, construiu-se a Tabela 3.

Os intervalos de classes, baseados nos valores das concentrações de sulfato, tomaram como ponto de referência o limite legislado de 250 mg L⁻¹, verificando-se uma distribuição extremamente assimétrica, com amplitude de teores de 0 a 3.250 mg L⁻¹.

Tabela 3 - Distribuição dos teores de sulfato, por intervalo de classes, das 2.792 amostras

Classes de teores de sulfato (mg L⁻¹)	Frequência	%
0 – 250	2503	89,65%
250 - 500	170	6,09%
500 - 750	70	2,51%
750 - 1000	23	0,82%
1000 - 1250	8	0,29%
1250 - 1500	5	0,18%
1500 - 1750	4	0,14%
1750 - 2000	6	0,21%
2000 - 2250	1	0,04%
2250 - 2500	1	0,04%
2500 - 2750	0	0,00%
2750 - 3000	0	0,00%
3000 - 3250	1	0,04%

Fonte: O autor.

Constata-se por meio da Tabela 3 que aproximadamente 90% das 2.792 amostras estudadas neste trabalho possuem teores de sulfato compreendidos entre 0 mg L⁻¹ e 250 mg L⁻¹. Isso indica que a predominância dos teores de sulfato no universo das 2.792 amostras de água subterrânea é de teores mais baixos.

Dentro dessa classe de concentrações entre 0 mg L⁻¹ e 250 mg L⁻¹ estão as amostras que possuem teores de sulfato em acordo com o limite de 250 mg L⁻¹ estabelecido pelo Portaria 2914/11 do MS.

Na Tabela 4 tem-se a distribuição dos teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹, somente para as 289 amostras de água subterrânea, por intervalo de classes de concentração, com amplitude de 251 a 3.331 mg L⁻¹.

Tabela 4 – Distribuição dos teores de sulfato, por intervalo de classes de concentração, das 289 amostras enriquecidas em sulfato

Classes de teores de sulfato (mg L ⁻¹)	Frequência	%
251 – 559	184	63,67%
559 – 867	66	22,84%
867 – 1175	20	6,92%
1175 – 1483	5	1,73%
1483 – 1791	5	1,73%
1791 – 2099	6	2,08%
2099 – 2407	2	0,69%
2407 – 2715	0	0,00%
2715 – 3023	0	0,00%
3023 – 3331	1	0,35%

Fonte: O autor.

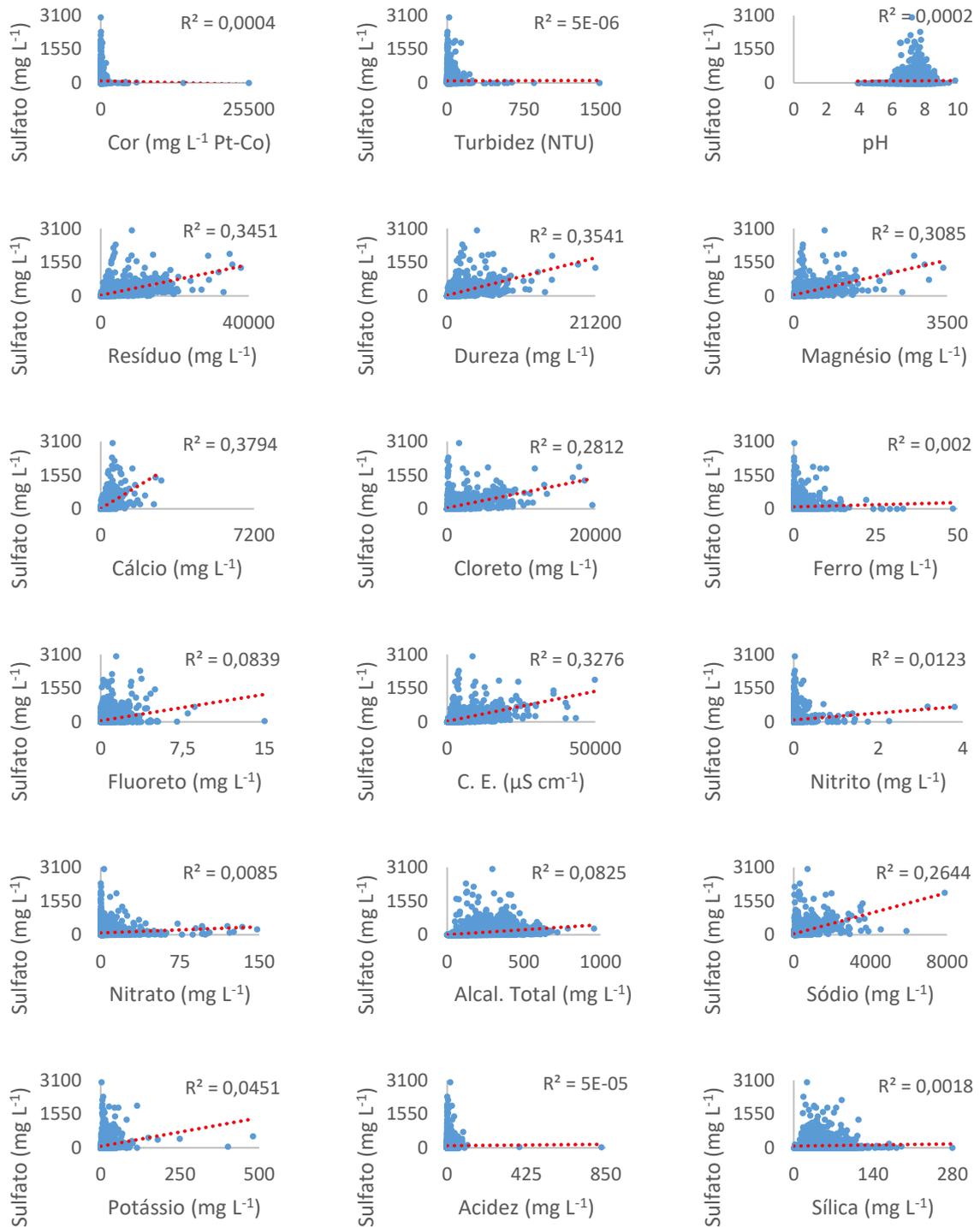
Da observação da Tabela 4, verifica-se que, assim como aconteceu com o universo das 2.792 amostras, para as 289 amostras enriquecidas em sulfato, a maior frequência (63,67%) encontra-se no primeiro intervalo de classes, com teores entre 251 mg L⁻¹ e 559 mg L⁻¹. O segundo intervalo de classes (559 mg L⁻¹ a 867 mg L⁻¹) também apresentou uma significativa frequência de amostras, com 22,84%.

Os histogramas das 2.792 amostras e das 289 amostras enriquecidas em sulfato possuem formatos semelhantes entre si, expressam o seguinte padrão: maiores percentuais no primeiro intervalo de classe, decrescendo significativamente a partir daí. Em ambos os casos, verifica-se forte assimetria dos dados analisados.

6.3.2. Análise Bivariada

Para investigar a relação entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos analisados, foi feita a análise bivariada através dos gráficos de dispersão, apresentados na Figura 20 (para o universo das 2.792 amostras) e no Apêndice B (para as 289 amostras enriquecidas em sulfato).

Figura 20 – Gráficos de dispersão entre o sulfato e os parâmetros físicos e químicos, para o universo das 2.792 amostras estudadas



Fonte: O autor.

A Figura 20 apresenta os gráficos de dispersão, com as linhas de tendência e os valores de R^2 , da correlação entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos estudados, para o universo das 2.792 amostras.

Pode-se verificar na Figura 20 que os valores de R^2 foram baixos, e parecem indicar uma fraca correlação entre o sulfato e os demais parâmetros físicos e químicos. Da análise dos gráficos de dispersão com as linhas de tendência e também considerando os valores de R^2 , parecem indicar uma correlação entre o sulfato e os seguintes parâmetros: cálcio, dureza, resíduo, condutividade elétrica, magnésio, cloreto, sódio, fluoreto e potássio.

Embora os valores de R^2 para o fluoreto (0,0839) e potássio (0,0451) estejam mais próximos de 0, as linhas de tendência parecem indicar que há uma correlação linear entre esses parâmetros e o sulfato.

Da mesma forma, como pode ser observado no Apêndice B, tem-se os gráficos de dispersão, com as linhas de tendência e os valores de R^2 , da correlação entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos estudados, para as 289 amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

Pode-se verificar nos gráficos de dispersão do Apêndice B que, em virtude da redução na quantidade de dados analisados (do universo das 2.792 amostras, apenas as 289 amostras enriquecidas em sulfato foram analisadas dessa vez), os valores de R^2 também diminuiram. Apesar dos baixos valores de R^2 , a análise dos gráficos (linhas de tendência e valores de R^2) parece indicar, ainda que fraca, uma correlação entre sulfato e os seguintes parâmetros: cálcio, dureza, resíduo total, magnésio, alcalinidade, condutividade elétrica, fluoreto, cloreto, sódio e nitrato.

Ainda como parte da análise bivariada entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos, foram construídas matrizes de correlação, utilizando tanto a técnica paramétrica (Pearson), quanto a técnica não paramétrica (Spearman) para efeito de comparação dos valores obtidos para os coeficientes de correlação, devido à fragilidade na tomada dos dados desses parâmetros estudados.

Em ambas as matrizes os coeficientes de correlação variam entre -1 e 1, onde um coeficiente no valor de 1 indica uma correlação direta e um coeficiente no valor de -1 indica uma correlação inversa. Coeficientes no valor de $\pm 0,7$ indicam correlação forte entre as variáveis.

Como a matriz de Pearson é aplicada à verificação de correlação linear entre variáveis, supondo que os dados possuam distribuição normal (simétrica), os resultados obtidos na matriz de Pearson são frágeis, pois, foi verificado, por meio da

distribuição das concentrações de sulfato em intervalos de classes, que esses dados possuem uma distribuição bastante assimétrica, não tem linearidade.

A matriz de Pearson, Quadro 7, mostra os coeficientes de correlação, sendo correlações significativas moderada a fraca entre o sulfato e os seguintes parâmetros: cálcio (0,62), dureza (0,60), resíduo (0,59), condutividade (0,57), magnésio (0,56), cloreto (0,53) e sódio (0,51). Como também, observa-se correlações fracas entre o sulfato e os parâmetros: fluoreto (0,29), alcalinidade (0,29) e potássio (0,21).

Por outro lado, como os dados estudados apresentaram uma distribuição muito assimétrica, com valores discrepantes, não obedecendo à distribuição gaussiana, a análise de correlação entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos realizada através da utilização da técnica não paramétrica, a matriz de correlação de Spearman (Quadro 8), traz resultados mais confiáveis.

Os resultados dos coeficientes de correlação obtidos com a matriz de Spearman, Quadro 8, foram mais significativos, indicando correlação forte entre o sulfato e os seguintes parâmetros: resíduo (0,84), condutividade (0,84), dureza (0,81), magnésio (0,80), cálcio (0,79), sódio (0,79) e cloreto (0,78). Além disso, indica também uma correlação moderada entre o sulfato e: alcalinidade (0,68), fluoreto (0,58) e potássio (0,48), como também uma fraca correlação entre o sulfato e os parâmetros: nitrato (0,38), sílica (0,28) e nitrito (0,27).

O Quadro 7 e o Quadro 8 apresentam as matrizes de correlação de Pearson e Spearman, respectivamente, que exprimem numericamente os valores de correlação entre os parâmetros, para o universo das 2.792 amostras, em todos os domínios hidrogeológicos.

Quadro 7 - Matriz de correlação linear de Pearson para o universo das 2.792 amostras de água subterrânea

	Resid.	Dureza	Ca ²⁺	Na ⁺	SiO ₂	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Cond.	Cor	Fe	F ⁻	Mg ²⁺	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Turb.	Acid.	K ⁺	Alcal Total
Resíduo	1,00																		
Dureza	0,96	1,00																	
Ca ²⁺	0,89	0,93	1,00																
Na ⁺	0,88	0,77	0,69	1,00															
SiO ₂	0,15	0,14	0,13	0,13	1,00														
pH	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,11	1,00													
Cl ⁻	0,98	0,95	0,86	0,91	0,14	-0,02	1,00												
NO ₃ ⁻	0,19	0,18	0,22	0,18	0,13	0,01	0,17	1,00											
Condutividade	0,96	0,93	0,85	0,91	0,16	0,00	0,97	0,20	1,00										
Cor	0,05	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	-0,03	-0,02	1,00									
Fe	0,14	0,10	0,09	0,07	-0,01	-0,16	0,11	-0,08	0,09	0,55	1,00								
F ⁻	0,23	0,22	0,23	0,26	0,11	0,19	0,22	0,10	0,25	-0,03	-0,05	1,00							
Mg ²⁺	0,95	0,98	0,85	0,78	0,14	-0,01	0,95	0,15	0,92	-0,01	0,10	0,20	1,00						
NO ₂ ⁻	0,21	0,23	0,20	0,21	0,06	0,00	0,24	0,18	0,26	-0,01	-0,01	0,16	0,23	1,00					
SO ₄ ²⁻	0,59	0,60	0,62	0,51	0,04	0,01	0,53	0,09	0,57	-0,02	0,04	0,29	0,56	0,11	1,00				
Turbidez	0,04	0,03	0,02	0,02	-0,02	-0,09	0,03	-0,05	0,02	0,54	0,53	-0,05	0,02	-0,01	0,00	1,00			
Acidez	0,07	0,07	0,05	0,06	0,00	-0,22	0,07	-0,01	0,07	0,02	0,09	-0,02	0,07	0,04	0,01	0,05	1,00		
K ⁺	0,42	0,39	0,35	0,39	0,17	0,00	0,42	0,10	0,44	-0,01	0,05	0,10	0,38	0,10	0,21	0,03	0,10	1,00	
Alcal Total	0,35	0,35	0,34	0,35	0,21	0,31	0,31	0,19	0,38	-0,05	-0,11	0,32	0,33	0,12	0,29	-0,10	-0,04	0,20	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha = 0,05$ e $n = 2.792$ é 0,197. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos da água subterrânea.

Fonte: O autor.

Quadro 8 - Matriz de correlação de Spearman para o universo das 2.792 amostras de água subterrânea

	Resíduo	Dureza	Ca ²⁺	Na ⁺	SiO ₂	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Cond	Cor	Fe	F ⁻	Mg ²⁺	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Turb.	Acid.	K ⁺	Alcal Total
Resíduo	1,00																		
Dureza	0,95	1,00																	
Ca ²⁺	0,92	0,98	1,00																
Na ⁺	0,90	0,80	0,75	1,00															
SiO ₂	0,40	0,36	0,32	0,41	1,00														
pH	0,10	0,11	0,12	0,13	0,11	1,00													
Cl ⁻	0,94	0,88	0,83	0,90	0,39	0,03	1,00												
NO ₃ ⁻	0,44	0,44	0,43	0,36	0,20	-0,05	0,45	1,00											
Condutividade	0,99	0,96	0,93	0,92	0,38	0,12	0,94	0,44	1,00										
Cor	-0,01	-0,05	-0,05	0,00	-0,02	-0,13	0,01	-0,16	-0,03	1,00									
Fe	0,00	-0,04	-0,05	0,02	0,03	-0,21	0,04	-0,24	-0,02	0,55	1,00								
F ⁻	0,56	0,53	0,52	0,59	0,30	0,22	0,51	0,22	0,58	0,03	-0,02	1,00							
Mg ²⁺	0,94	0,96	0,90	0,83	0,40	0,10	0,90	0,42	0,95	-0,05	-0,02	0,53	1,00						
NO ₂ ⁻	0,35	0,33	0,32	0,32	0,14	0,05	0,35	0,38	0,34	0,08	0,06	0,22	0,33	1,00					
SO ₄ ²⁻	0,84	0,81	0,79	0,79	0,28	0,09	0,78	0,38	0,84	-0,02	0,00	0,58	0,80	0,27	1,00				
Turbidez	-0,04	-0,09	-0,10	-0,04	-0,03	-0,14	0,00	-0,19	-0,07	0,61	0,71	-0,06	-0,07	0,02	-0,06	1,00			
Acidez	-0,11	-0,13	-0,14	-0,12	-0,08	-0,43	-0,06	0,02	-0,13	-0,18	0,06	-0,20	-0,12	-0,05	-0,12	-0,02	1,00		
K ⁺	0,66	0,61	0,55	0,66	0,38	0,04	0,71	0,30	0,66	0,02	0,04	0,33	0,65	0,23	0,48	0,03	-0,07	1,00	
Alcal Total	0,70	0,74	0,72	0,61	0,26	0,27	0,57	0,36	0,72	-0,15	-0,18	0,53	0,71	0,22	0,68	-0,22	-0,18	0,35	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha=0,05$ e $n=2.792$ é 0,197. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos da água subterrânea.

Fonte: O autor.

Os melhores resultados obtidos com a matriz de correlação de Spearman, em contraponto com a matriz de correlação linear de Pearson, podem ser compreendidos quando se observa o comportamento dos gráficos de dispersão da Figura 20, observando-se ausência de correlação linear entre os dados, bem como distribuições extremamente assimétricas. Esses gráficos, embora mostrem um alinhamento entre o sulfato e os parâmetros correlacionados, não indicam uma perfeita linearidade entre eles.

Da mesma forma que foi feito para o universo das 2.792 amostras de água subterrânea, também foram construídas as matrizes de correlação de Pearson e de Spearman para as 289 amostras de água subterrânea enriquecidas em sulfato, mostradas no Apêndice C.

A matriz de Pearson no Apêndice C mostra os coeficientes de correlação, sendo correlações fracas entre o sulfato e os seguintes parâmetros: cálcio (0,32), dureza (0,24), resíduo (0,21) e magnésio (0,20). Foi identificada também uma correlação inversa entre o sulfato e a alcalinidade total (-0,20).

Os coeficientes de correlação da matriz de Spearman no Apêndice C também evidenciaram correlações fracas entre o sulfato e os seguintes parâmetros: cálcio (0,38) e dureza (0,24). Foi identificada também uma correlação inversa entre o sulfato e o nitrato (-0,25).

A redução do número de amostras (289) para considerar somente aquelas com sulfato acima de 250 mg L⁻¹, alterou as correlações entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos, em comparação às 2792 amostras.

6.4. Classificação da Água Subterrânea segundo o Diagrama de PIPER

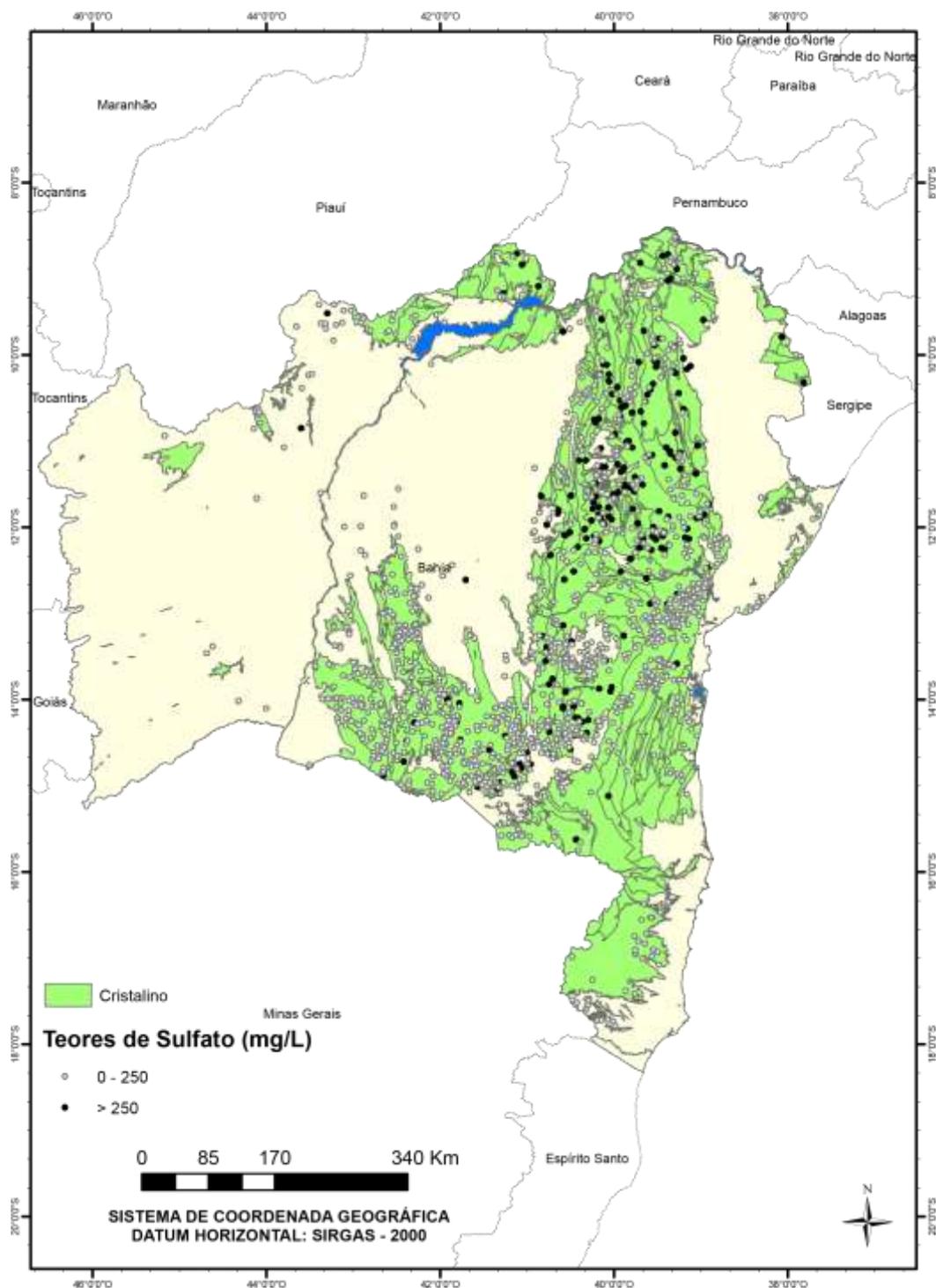
Para analisar as características hidroquímicas das 2.792 amostras de água de poços, perfurados entre 2003 e 2013 no estado da Bahia, confeccionou-se os diagramas de Piper, utilizando o software Qualigraf®, onde foi possível classificar e comparar os distintos tipos de água quanto aos íons dominantes.

Também foram construídos mapas de localização dos poços com teores de sulfato abaixo e acima de 250 mg L⁻¹, nos quatro domínios hidrogeológicos do estado da Bahia, bem como nas subdivisões destes domínios.

6.4.1. Domínio das Rochas Cristalinas

O mapa da Figura 21 apresenta a localização dos 1.400 poços no domínio das rochas cristalinas, em relação ao universo amostral de 2.792 poços, perfurados no período de 2003 a 2013 no estado da Bahia, e analisados neste trabalho.

Figura 21 – Mapa de localização dos 1.400 poços do domínio das rochas cristalinas.



Fonte: O autor.

O domínio das rochas cristalinas possui a maior extensão de área no território baiano. Para a confecção dos diagramas de Piper, os poços deste domínio foram espacializados em três compartimentos: cristalino centro-norte, cristalino centro-sul e cristalino sudoeste.

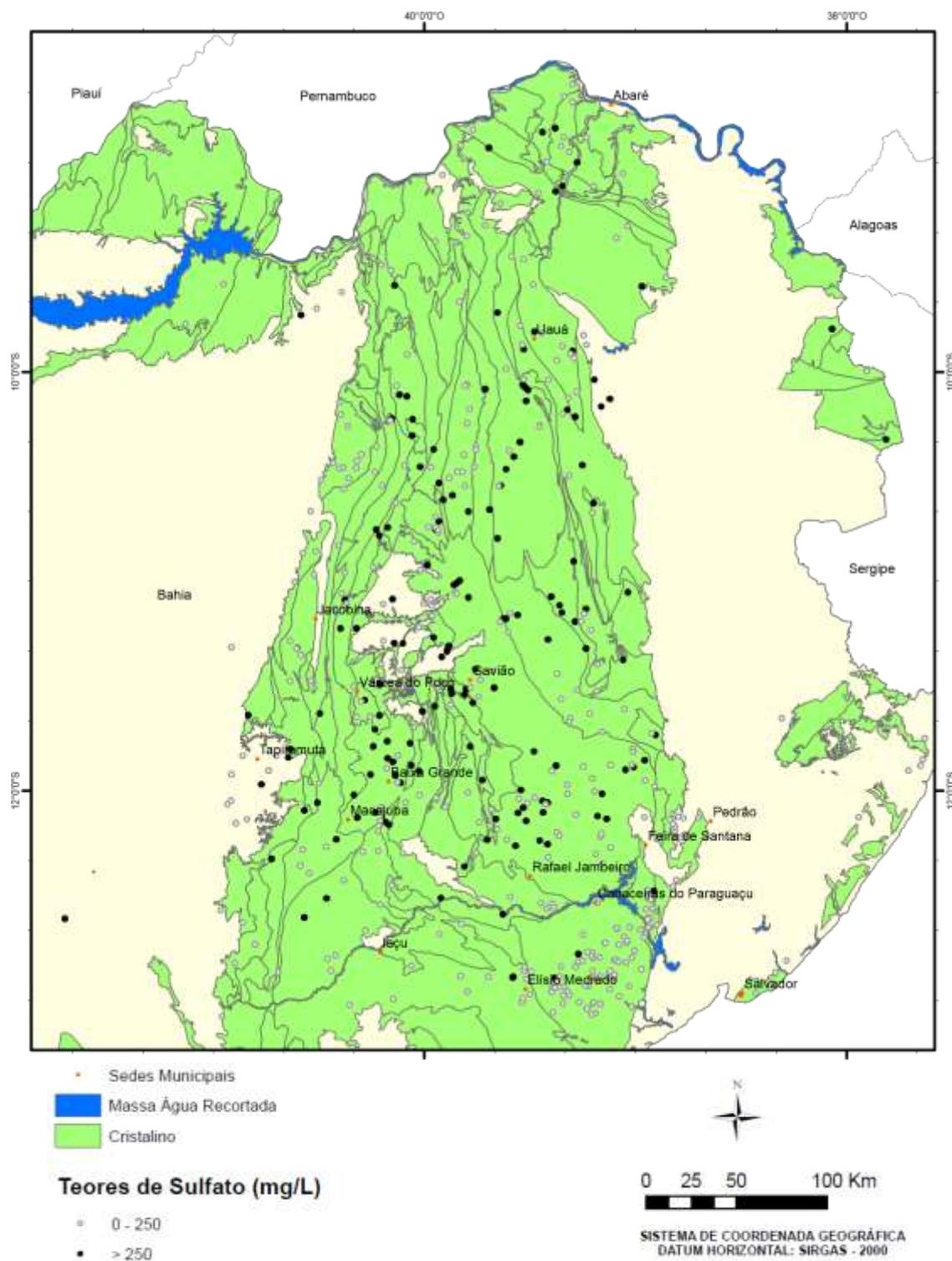
A análise de cada compartimento foi feita a partir da disposição espacial dos poços com teores de sulfato acima e abaixo de 250 mg L^{-1} , com base nos municípios que compõem cada um dos compartimentos.

Desses 1.400 poços localizados no domínio das rochas cristalinas, 499 poços estão no compartimento cristalino centro-norte, 402 poços no compartimento cristalino centro-sul e 499 poços no compartimento cristalino sudoeste.

- Compartimento Cristalino Centro - Norte

A Figura 22 apresenta os 499 poços localizados no compartimento cristalino centro-norte.

Figura 22 – Mapa de localização dos 499 poços no cristalino centro - norte



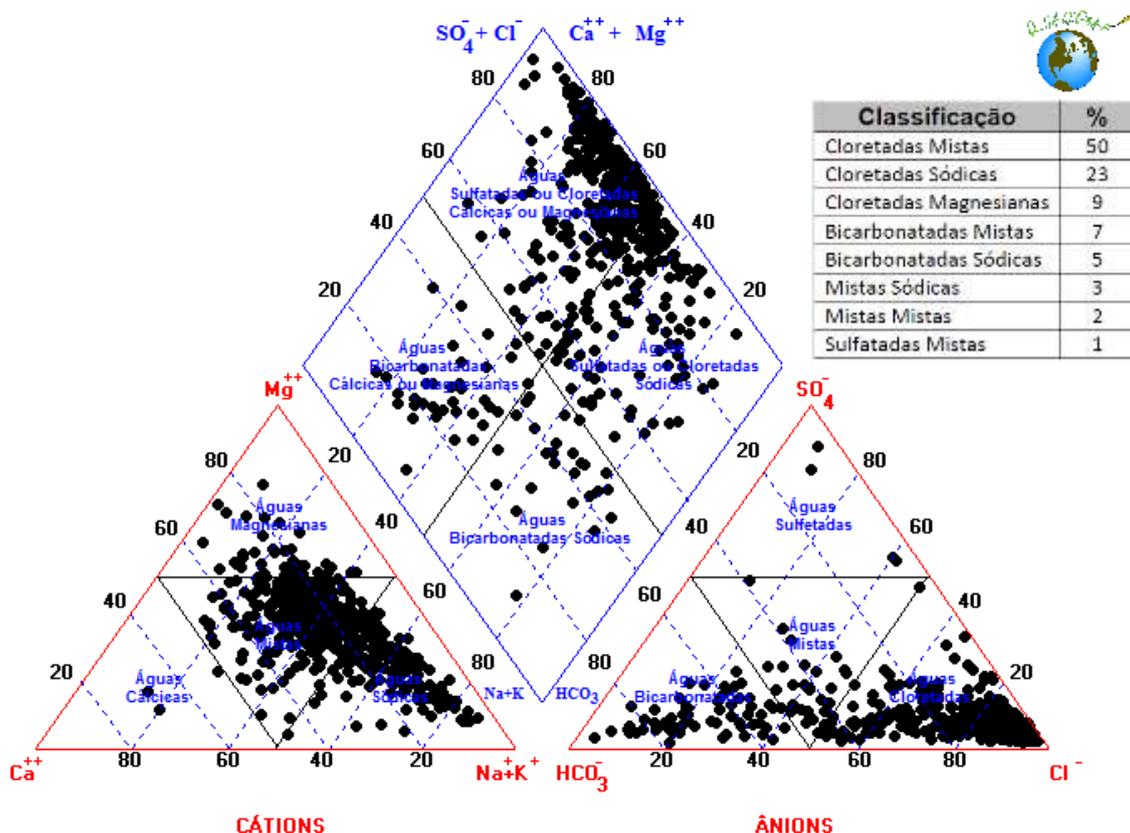
Fonte: O autor.

O cristalino centro – norte é o compartimento que possui a maior quantidade de poços com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹ (150 poços ou 30%).

A geologia nesse compartimento compreende os granulitos, gnaisses, migmatitos, anfibolitos, corpos máficos e ultramáficos, entre outros. Em relação ao clima desse compartimento, ocorrem os tipos: úmido, úmido a subúmido, subúmido a seco, semiárido e árido.

A Figura 23 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas das águas subterrâneas deste compartimento.

Figura 23 – Diagrama de Piper com os 499 poços localizados no compartimento cristalino centro - norte



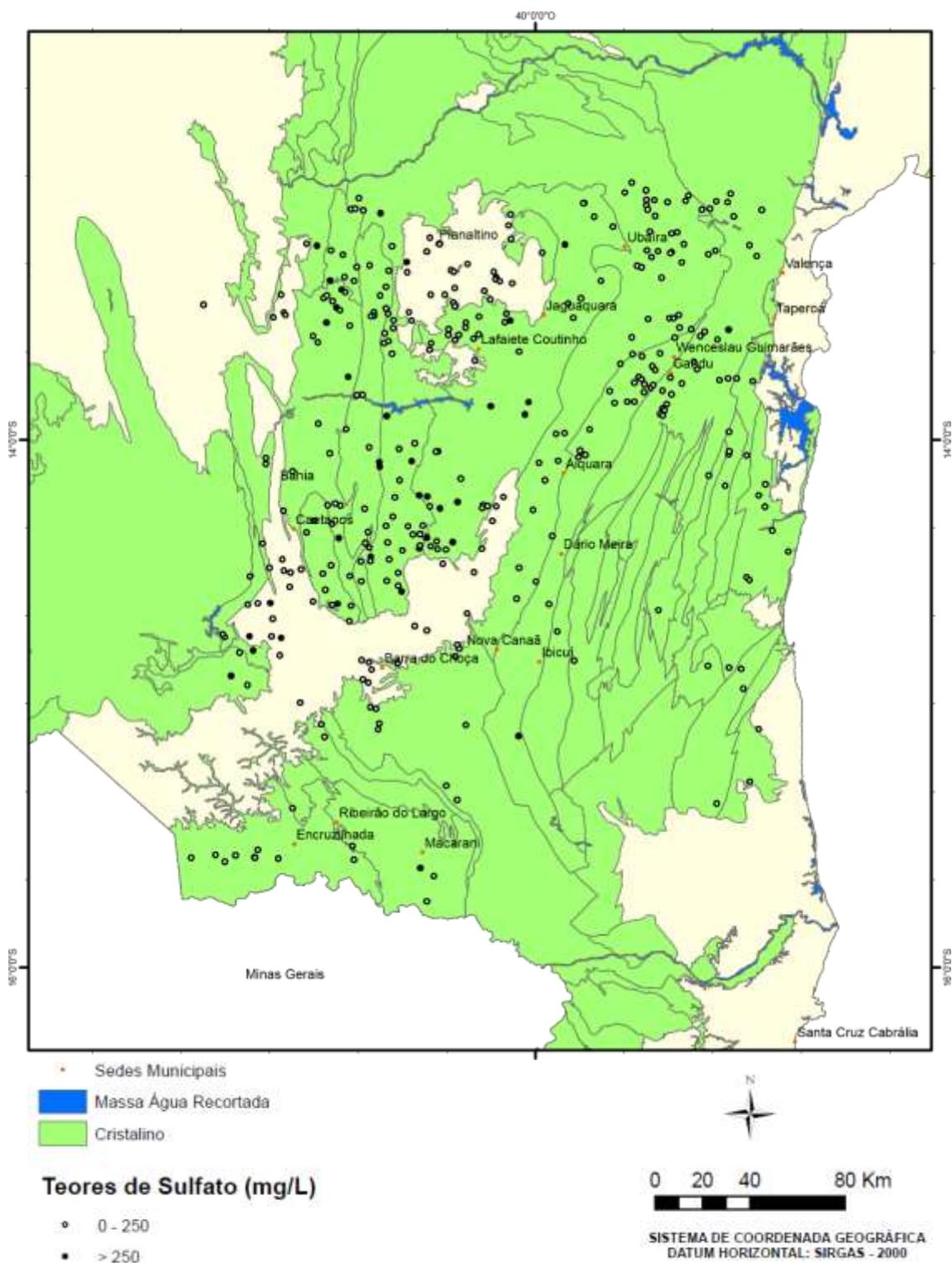
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 23 indica que as águas das 499 amostras do compartimento cristalino centro-norte se classificam predominantemente como: 50% cloretadas mistas, 23% cloretadas sódicas, entre outros percentuais menores. Quanto às 150 amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 499 amostras analisadas, também se observou um predomínio de águas cloretadas mistas (70%) e cloretadas sódicas (17%).

- Compartimento Cristalino Centro - Sul

A Figura 24 apresenta os 402 poços distribuídos no compartimento cristalino centro-sul.

Figura 24 – Mapa de localização dos 402 poços no cristalino centro - sul



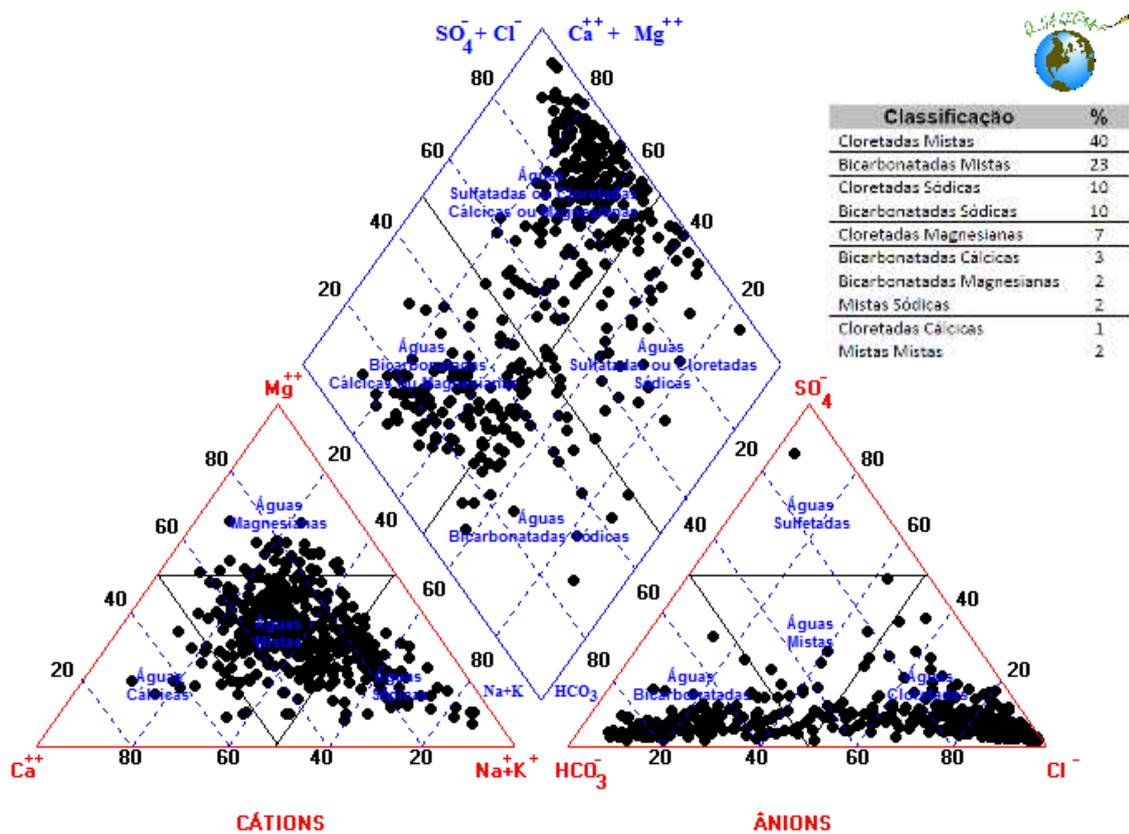
Fonte: O autor.

O cristalino centro – sul possui somente 37 poços (9,2%) com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

Quanto à geologia, nesse compartimento observa-se o predomínio dos granulitos. Em relação ao clima deste compartimento, ocorrem os tipos: úmido, úmido a subúmido, subúmido a seco e semiárido.

A Figura 25 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas das águas subterrâneas deste compartimento.

Figura 25 – Diagrama de Piper com os 402 poços localizados no compartimento cristalino centro - sul



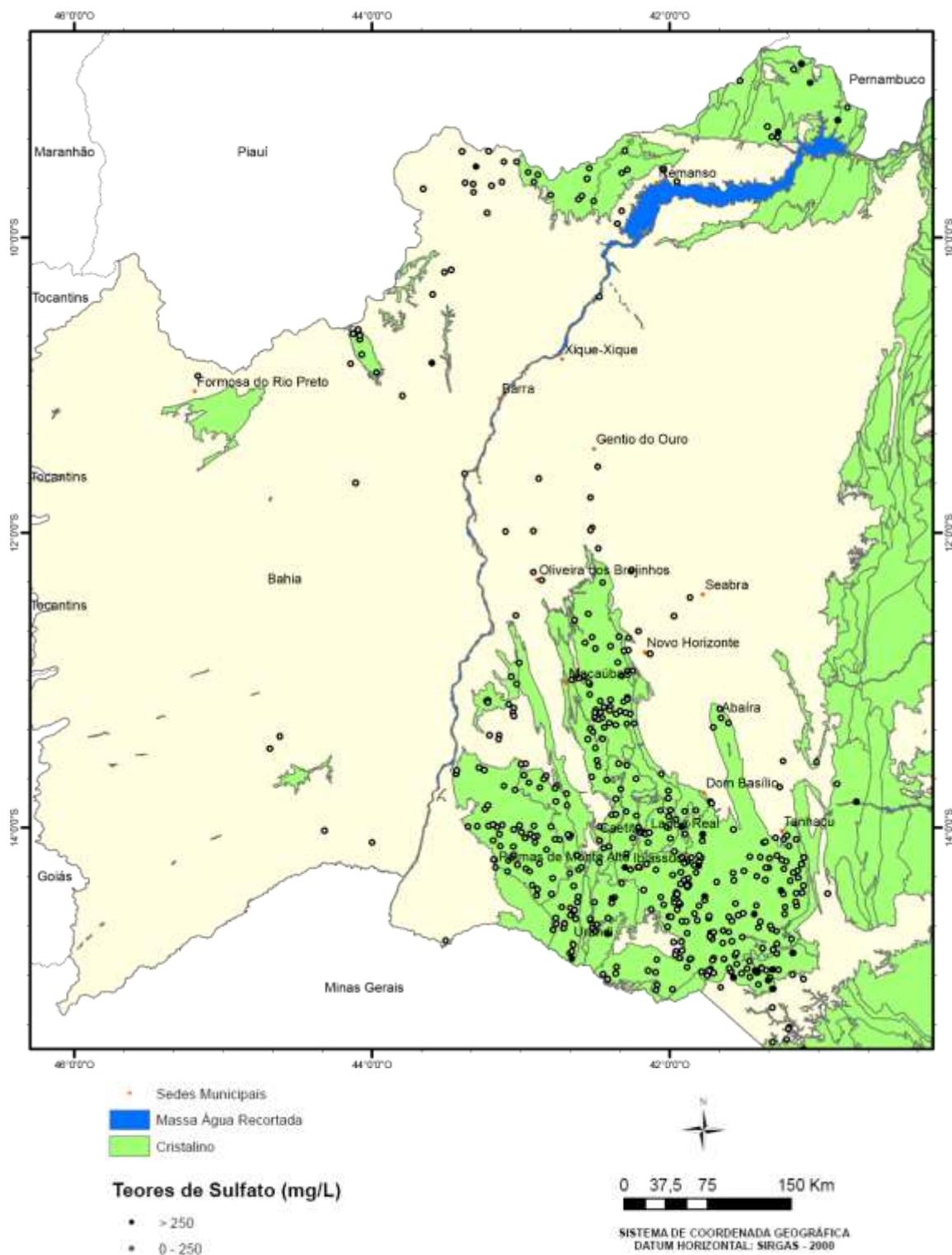
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 25 indica que as águas das 402 amostras localizadas no compartimento cristalino centro sul se classificam predominantemente como: 40% cloretadas mistas, 23% bicarbonatadas mistas, 10% cloretadas sódicas, 10% bicarbonatadas sódicas, entre outros percentuais menores. Quanto às 37 amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 402 amostras analisadas, observou-se um predomínio de águas cloretadas mistas (62%) e cloretadas magnesianas (24%).

- Compartimento Cristalino Sudeste

A Figura 26 apresenta os 499 poços localizados no compartimento cristalino sudeste.

Figura 26 – Mapa de localização dos 499 poços no cristalino centro - sudeste



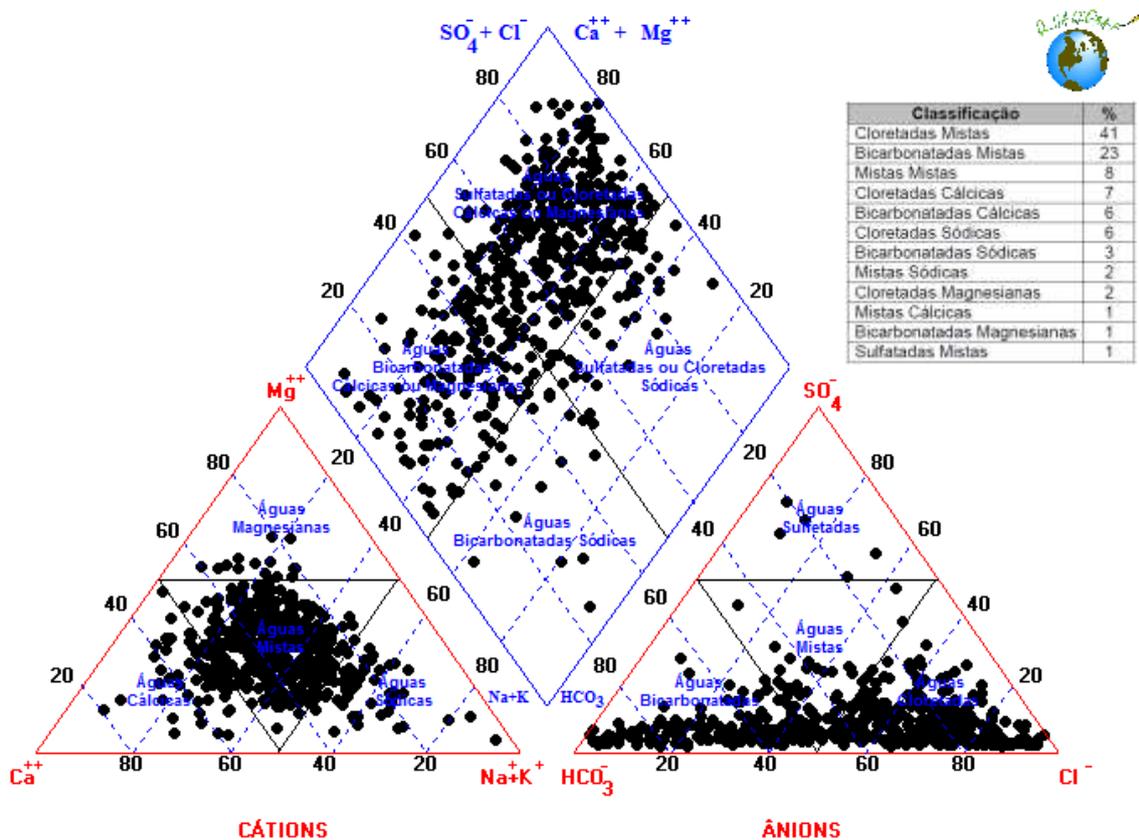
Fonte: O autor.

O cristalino sudeste possui somente 23 poços (4,6%) com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

Quanto à geologia, nesse compartimento observa-se o predomínio dos Greenstone belt. Em relação ao clima deste compartimento, ocorrem os tipos: subúmido a seco e semiárido.

A Figura 27 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas das águas subterrâneas deste compartimento.

Figura 27 – Diagrama de Piper com os 499 poços localizados no compartimento cristalino sudeste



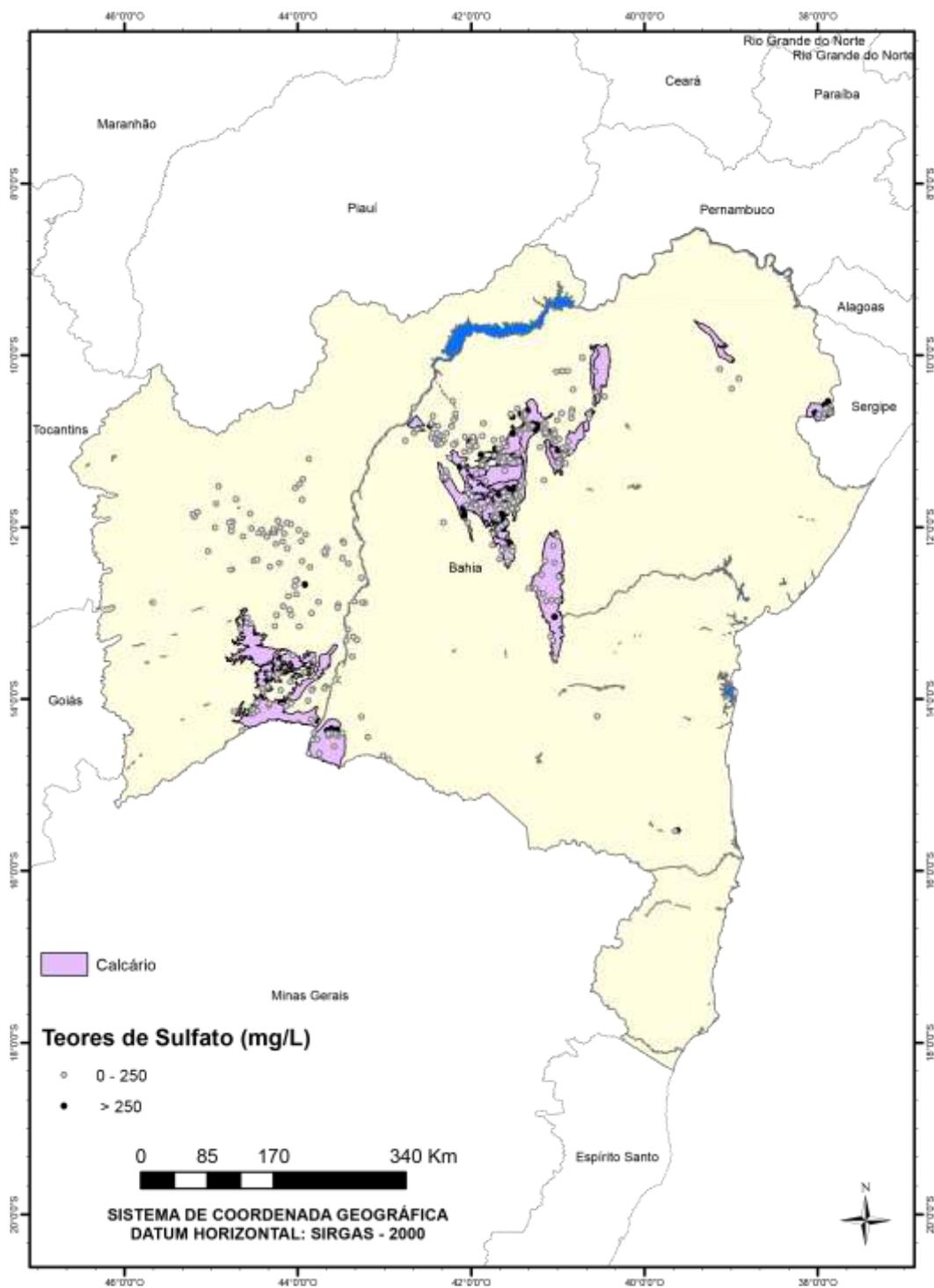
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 27 indica que as águas das 499 amostras do cristalino sudeste se classificam predominantemente como: 41% cloretadas mistas, 23% bicarbonatadas mistas, entre outros percentuais menores. Quanto às 23 amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 499 amostras analisadas, observou-se um predomínio de águas cloretadas mistas (43%), seguido das cloretadas sódicas (13%) e sulfatadas mistas (13%).

6.4.2. Domínio das Rochas Calcárias

O mapa da Figura 28 apresenta a localização dos 404 poços no domínio das rochas calcárias, em relação ao universo amostral de 2.792 poços, perfurados no período de 2003 a 2013 no estado da Bahia, e analisados neste trabalho.

Figura 28 – Mapa de localização dos 404 poços no domínio das rochas calcárias.



Fonte: O autor.

Do total de 404 poços do domínio calcário, 49 poços (12,1%) possuem teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹. Esses 49 poços equivalem a 17% sobre o total de amostras de água subterrânea enriquecidas em sulfato (289 amostras). Dessa forma, é considerado o segundo domínio hidrogeológico que mais contribuiu com poços tubulares com alto teor de sulfato.

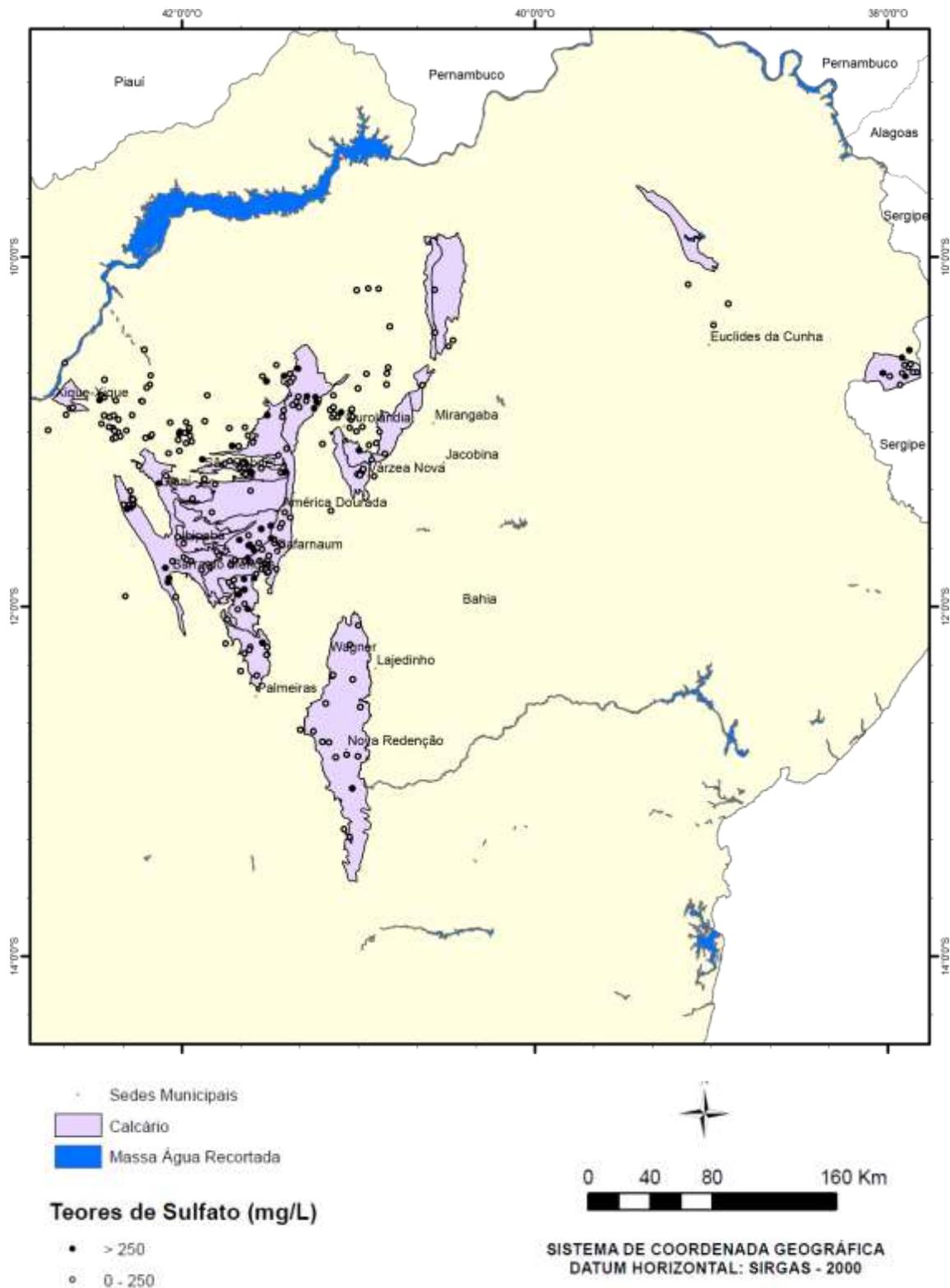
Neste trabalho, foi utilizada a subdivisão do domínio das rochas calcárias em dois compartimentos para a confecção dos diagramas de Piper e melhor visualização da distribuição dos teores de sulfato: calcário Irecê (com 262 poços) e calcário oeste (com 142 poços).

A análise de cada compartimento foi feita a partir da espacialização dos poços com teores de sulfato acima e abaixo de 250 mg L⁻¹, com base nos municípios que compõem cada um dos compartimentos.

- Compartimento Calcário Irecê

A Figura 29 apresenta os 262 poços localizados no compartimento calcário Irecê.

Figura 29 – Mapa de localização dos 262 poços no compartimento calcário Irecê

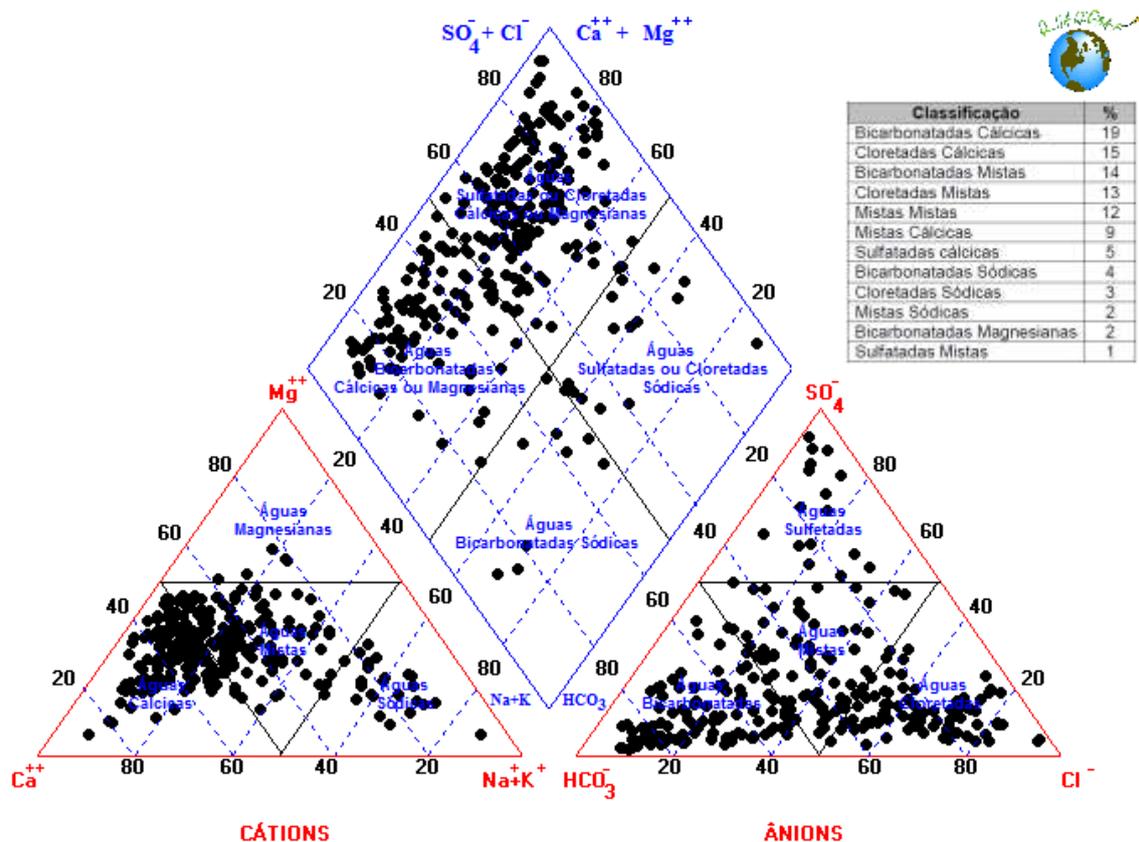


Fonte: O autor.

O calcário Irecê possui 43 poços (16,4%) com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹, sendo o compartimento do domínio calcário que possui maior número de poços contendo teores elevados de sulfato.

A Figura 30 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas das águas subterrâneas deste compartimento.

Figura 30 – Diagrama de Piper com os 262 poços localizados no compartimento calcário Irecê



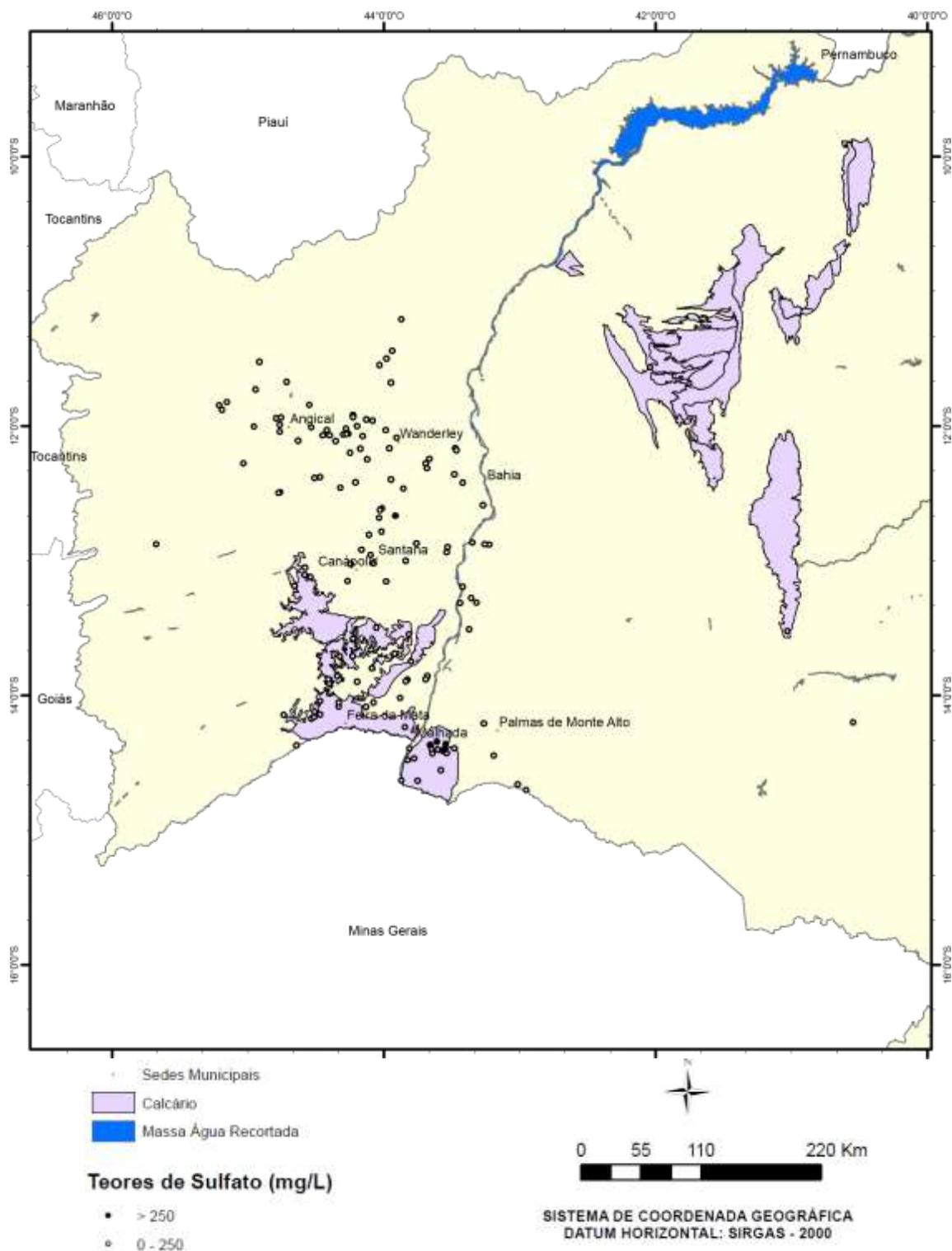
Fonte: O autor.

A Figura 30 evidencia as características hidroquímicas indicando que as águas das 262 amostras do compartimento calcário Irecê se classificam predominantemente como: 19% bicarbonatadas cálcicas, 15% cloretadas cálcicas, 14% bicarbonatadas mistas, 13% cloretadas mistas, 12% mistas mistas, entre outros percentuais menores. Em relação às 43 amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 262 amostras analisadas, observou-se um domínio de águas sulfatadas cálcicas (30%), mistas mistas (28%), cloretadas mistas (14%) e cloretadas cálcicas (12%).

- Compartimento Calcário Oeste

A Figura 31 apresenta os 142 poços localizados no compartimento calcário oeste.

Figura 31 – Mapa de localização dos 142 poços no compartimento calcário oeste

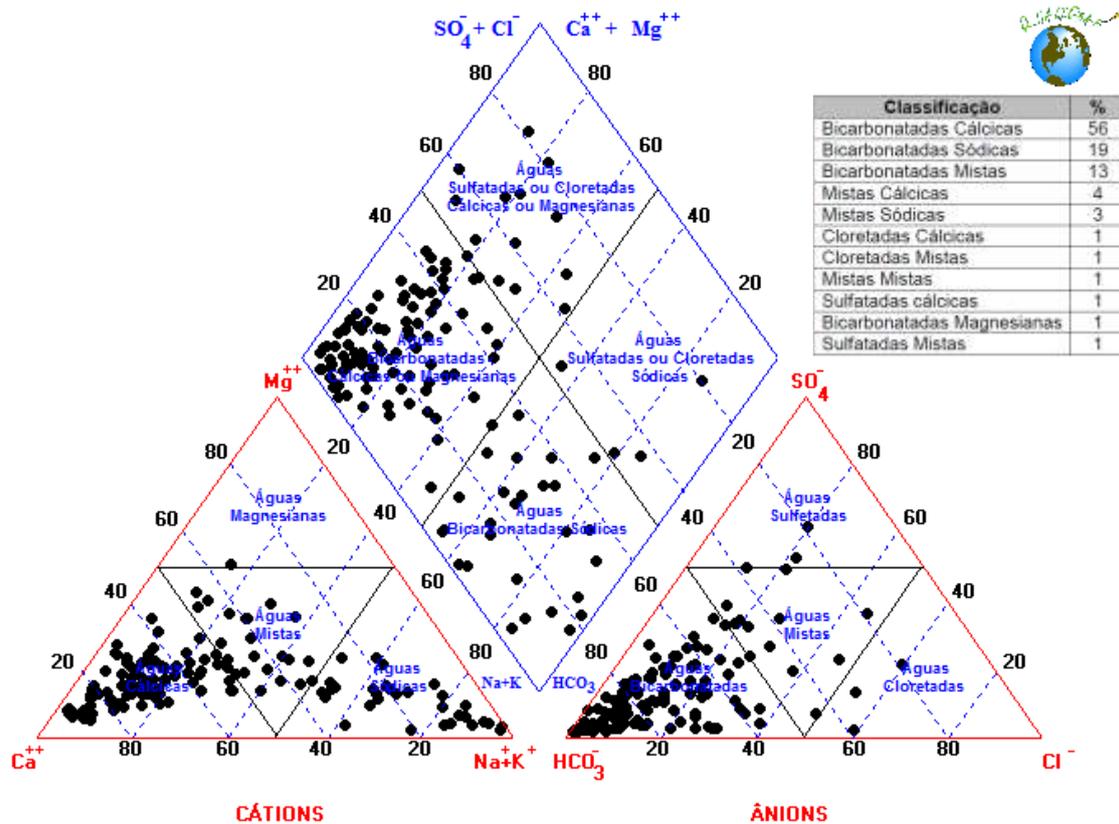


Fonte: O autor.

O calcário oeste possui somente 6 poços (4,2%) com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

A Figura 32 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas das águas subterrâneas deste compartimento.

Figura 32 – Diagrama de Piper com os 142 poços localizados no compartimento calcário oeste



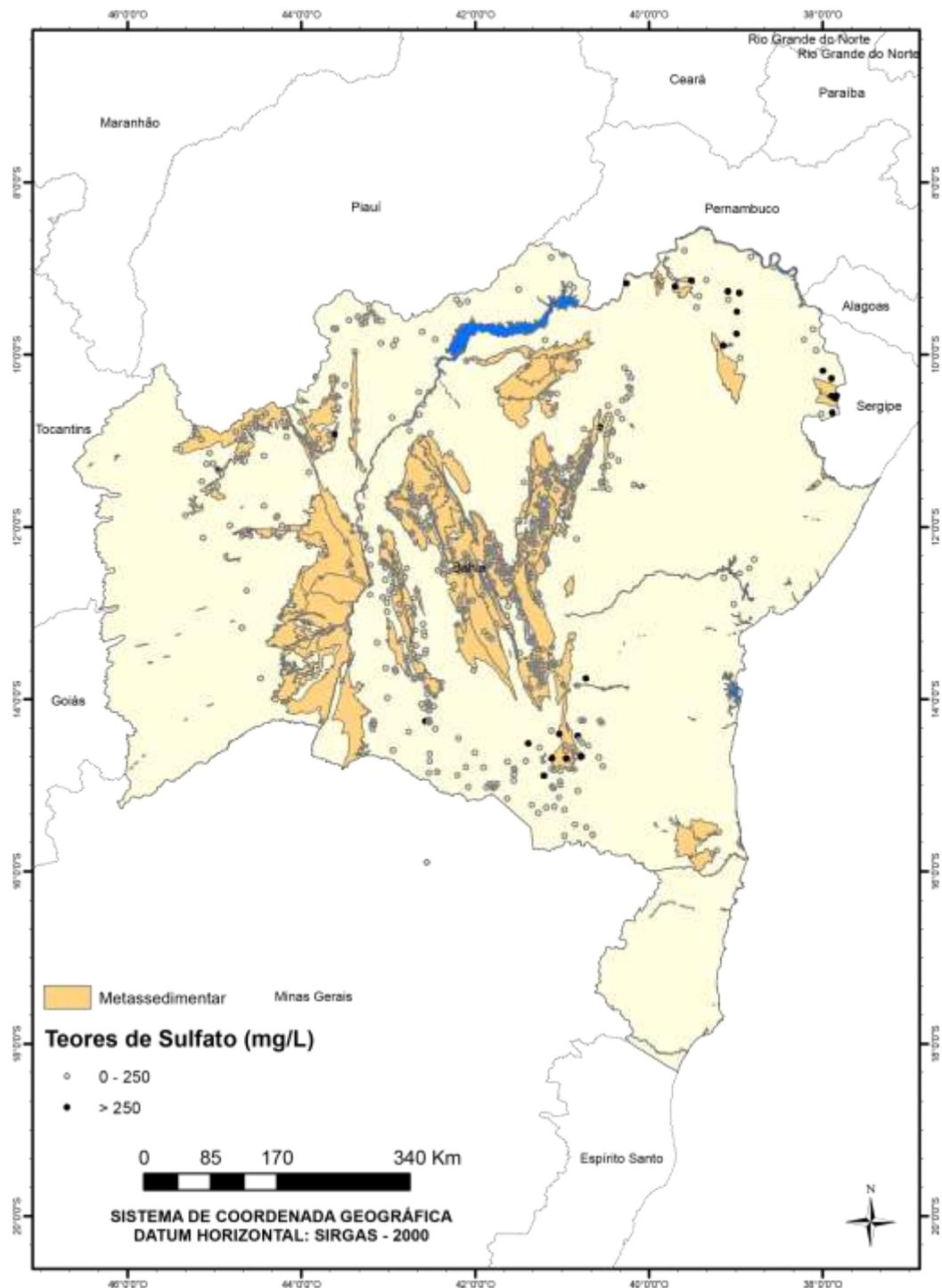
Fonte: O autor.

A Figura 32 evidencia as características hidroquímicas das 142 amostras do calcário oeste, que se classificam predominantemente como: 56% bicarbonatadas cálcicas, 19% bicarbonatada sódica, 13% bicarbonatadas mistas, entre outros percentuais menores. Esse elevado percentual de águas bicarbonatadas é justificado devido ao fator litológico do domínio hidrogeológico das rochas calcárias: rocha de origem química, de composição predominantemente carbonática. Em relação às 6 amostras enriquecidas em sulfato, parte do conjunto das 142 amostras analisadas, observou-se um domínio de águas sulfatadas cálcicas (33%), mistas sódicas (17%), mistas cálcicas (17%), sulfatadas mistas (17%) e cloretadas mistas (17%).

6.4.3. Domínio das Rochas Metassedimentares

O mapa da Figura 33 apresenta a localização dos 638 poços no domínio das rochas metassedimentares, do universo amostral dos 2.792 poços, perfurados no período de 2003 a 2013 no estado da Bahia, e analisados neste trabalho.

Figura 33 – Mapa de localização dos 638 poços no domínio metassedimentar.



Fonte: O autor.

O domínio das rochas metassedimentares se posiciona como o terceiro domínio hidrogeológico na quantidade de poços enriquecidos em sulfato, contribuindo com 26 (4,1%) amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

Diversas unidades litológicas compõem as rochas metassedimentares: Espinhaço Setentrional, Chapada Diamantina e Serra de Jacobina. Em relação ao clima, predomina o subúmido a seco.

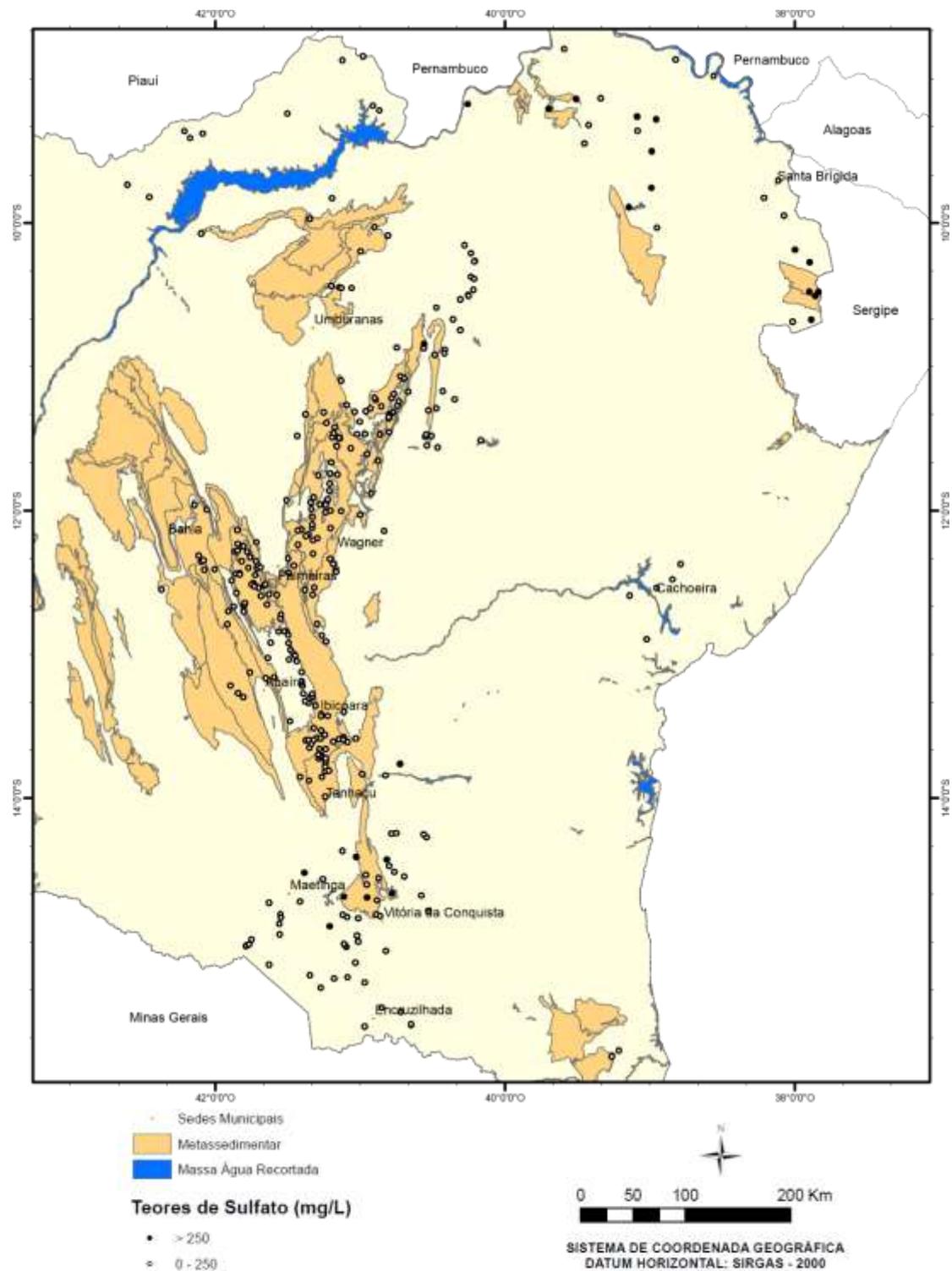
Neste trabalho, foi utilizada a subdivisão deste domínio em dois compartimentos para a confecção dos diagramas de Piper e melhor visualização da distribuição dos teores de sulfato: metassedimentar leste (com 356 poços) e metassedimentar oeste (com 282 poços).

A análise de cada compartimento foi feita a partir da espacialização dos poços com teores de sulfato acima e abaixo de 250 mg L⁻¹, com base nos municípios que compõem cada um dos compartimentos.

- Compartimento Metassedimentar Leste

A Figura 34 apresenta os 356 poços localizados no metassedimentar leste, sendo que 23 desses poços possuem teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

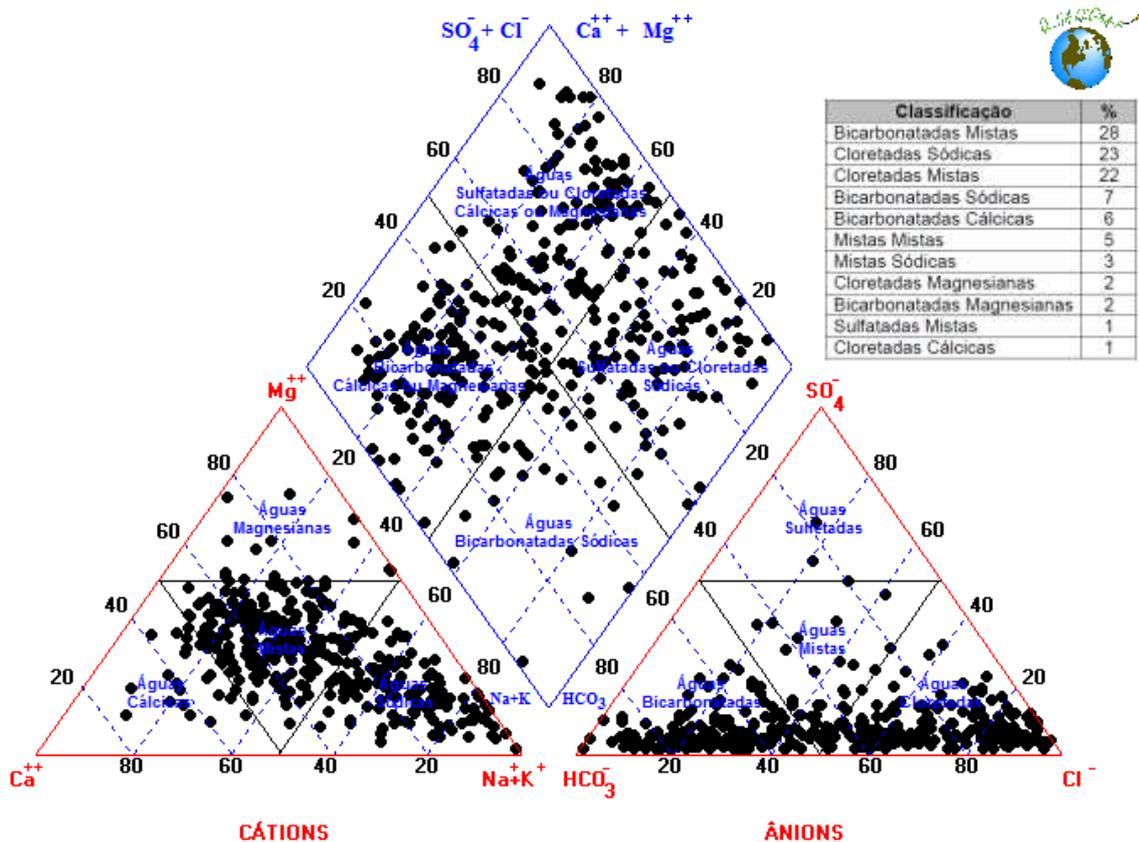
Figura 34 – Mapa de localização dos 356 poços no compartimento metassedimentar leste



Fonte: O autor.

A Figura 35 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 35 – Diagrama de Piper com os 356 poços localizados no compartimento metassedimentar leste



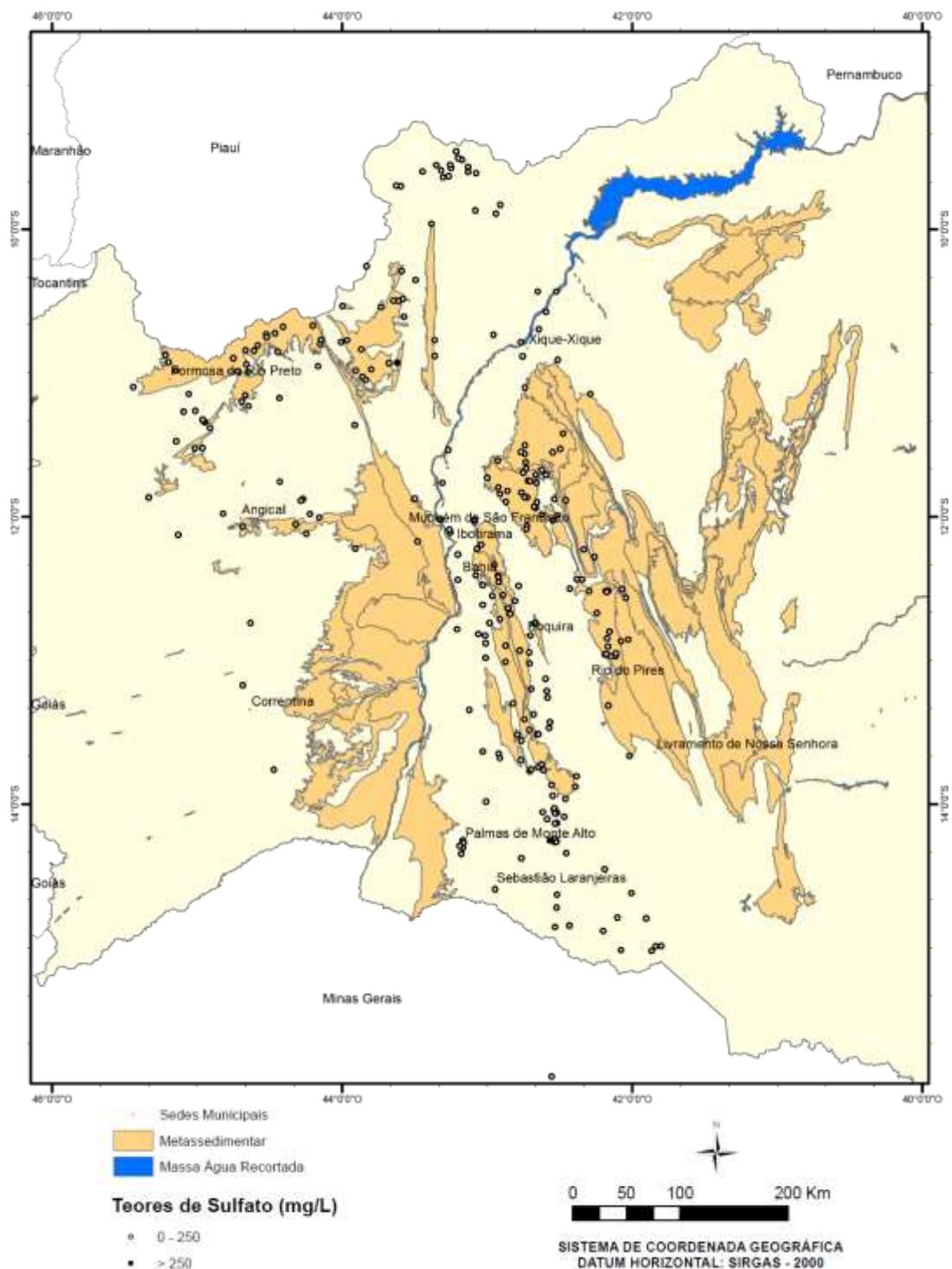
Fonte: O autor.

As características hidroquímicas foram observadas através do diagrama de Piper da Figura 35 que demonstrou que as águas das 356 amostras do compartimento metassedimentar leste se classificam predominantemente como: 28% bicarbonatadas mistas, 23% cloretadas sódicas, 22 cloretadas mistas, entre outros percentuais menores. Em relação às amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 356 amostras analisadas, observou-se um domínio de águas cloretadas mistas (61%) e cloretadas sódicas (13%).

- Compartimento Metassedimentar Oeste

O mapa da Figura 36 apresenta a localização dos 282 poços no compartimento metassedimentar oeste, sendo somente 3 poços com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

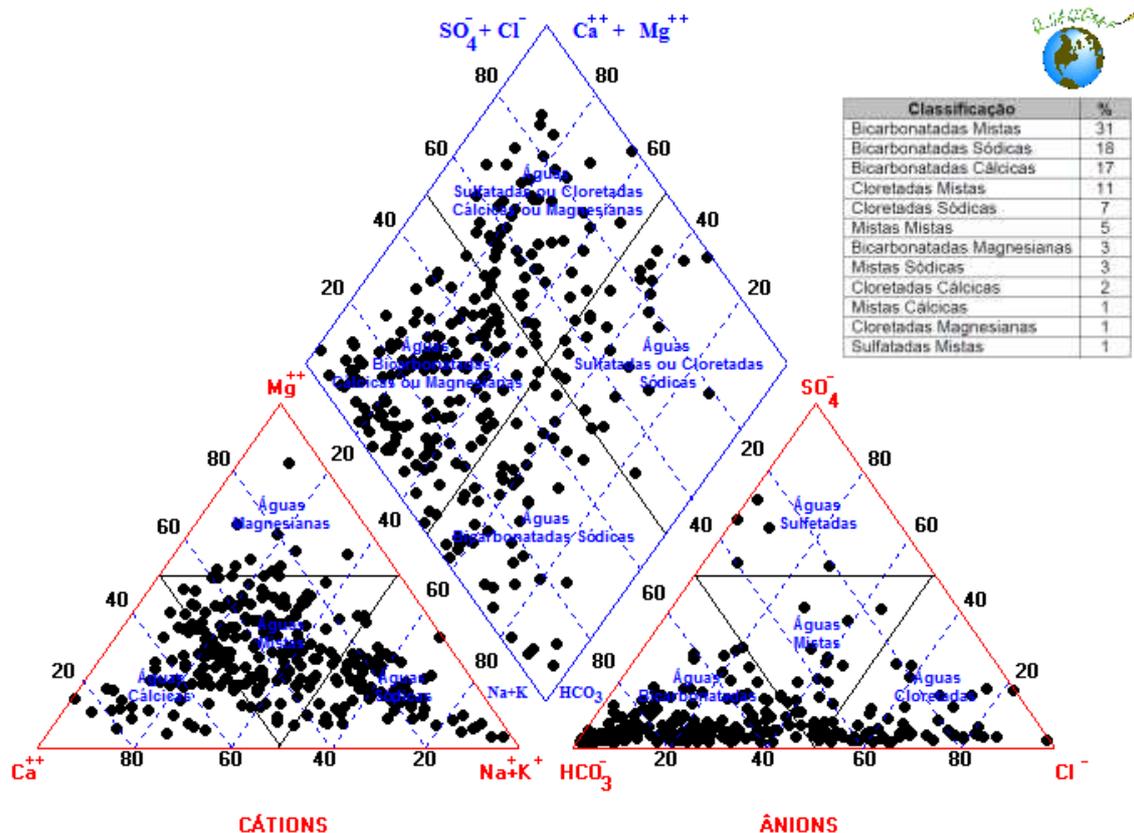
Figura 36 – Mapa de localização dos 282 poços no compartimento metassedimentar oeste



Fonte: O autor.

A Figura 37 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 37 – Diagrama de Piper com os 282 poços localizados no compartimento metassedimentar oeste



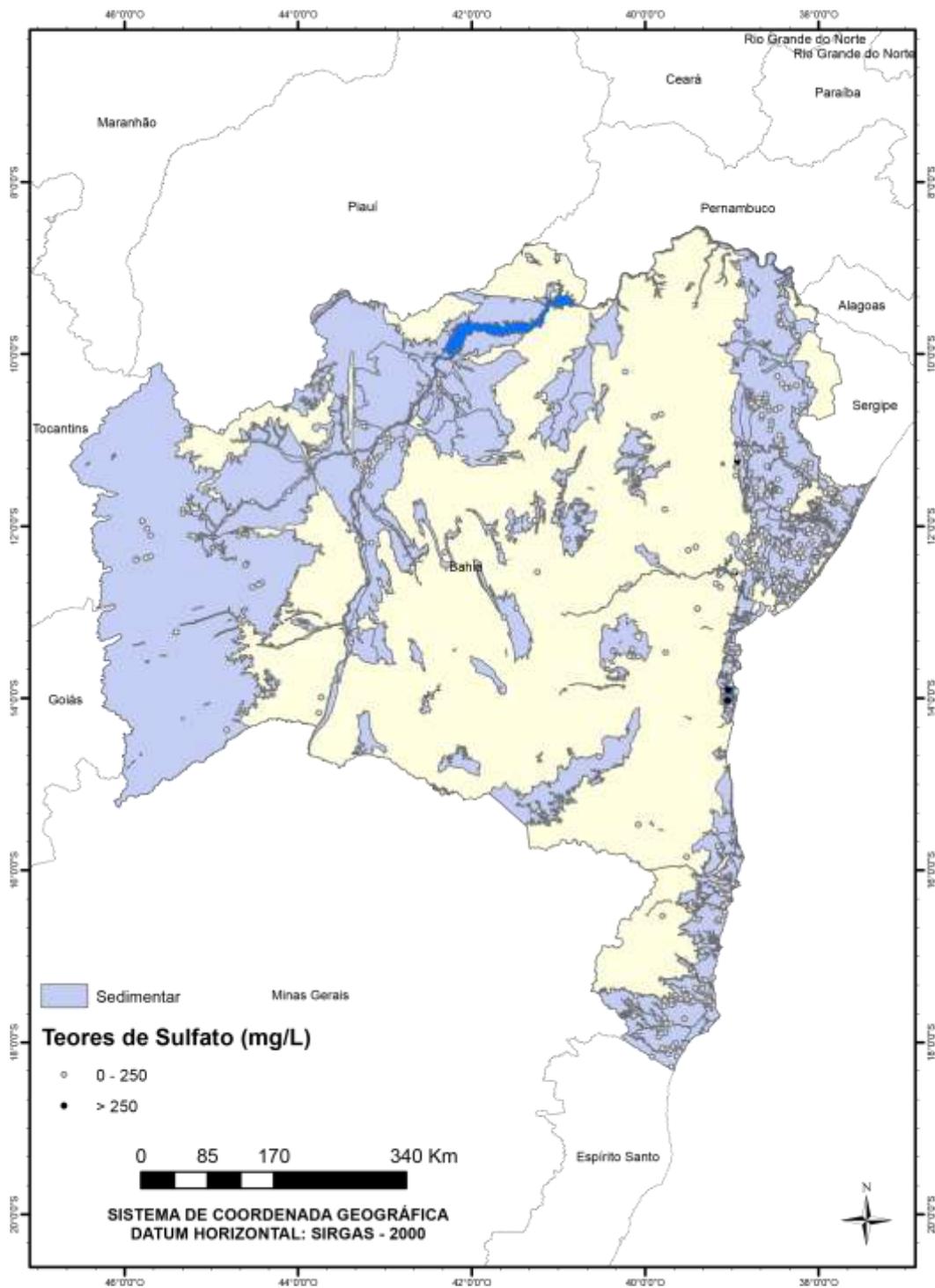
Fonte: O autor.

As características hidroquímicas foram observadas através do diagrama de Piper da Figura 37, que demonstrou que as águas das 282 amostras localizadas no compartimento metassedimentar oeste se classificam predominantemente como: 31% bicarbonatadas mistas, 18% bicarbonatadas sódicas, 17% bicarbonatadas cálcicas, 11% cloretadas mistas, entre outros percentuais menores. Em relação às amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 282 amostras analisadas, observou-se um domínio de águas sulfatadas cálcicas (67%) e mistas cálcicas (33%).

6.4.4. Domínio das Rochas Sedimentares

O mapa da Figura 38 apresenta a localização dos 350 poços no domínio das rochas sedimentares, do universo amostral dos 2.792 poços, perfurados no período de 2003 a 2013 no estado da Bahia, e analisados neste trabalho.

Figura 38 – Mapa de localização dos 350 poços no domínio das rochas sedimentares.



Fonte: O autor.

O domínio das rochas sedimentares é o domínio hidrogeológico com o menor percentual de poços tubulares enriquecidos em sulfato.

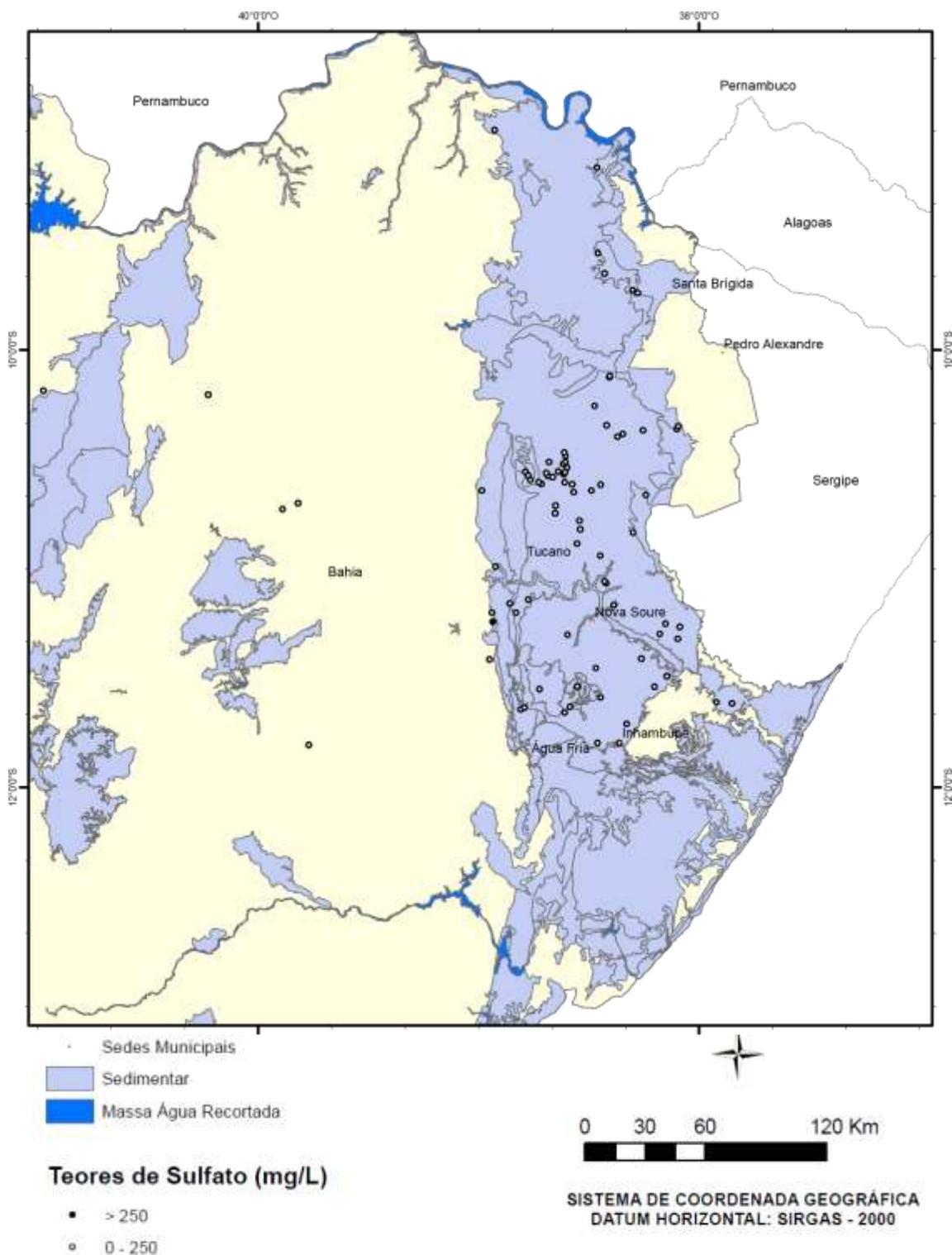
Neste trabalho, foi utilizada a subdivisão deste domínio em quatro compartimentos para a confecção dos diagramas de Piper e melhor visualização da distribuição dos teores de sulfato: Tucano (com 82 poços), Recôncavo – Camamu (com 124 poços), Litoral Sul (com 83 poços) e Uruçuia (com 61 poços).

A análise de cada compartimento foi feita a partir da espacialização dos poços com teores de sulfato acima e abaixo de 250 mg L^{-1} , com base nos municípios que compõem cada um dos compartimentos.

- Compartimento Sedimentar Tucano

O mapa da Figura 39 apresenta a localização dos 82 poços, distribuídos no compartimento Tucano, sendo que apenas 1 poço possui teor elevado de sulfato.

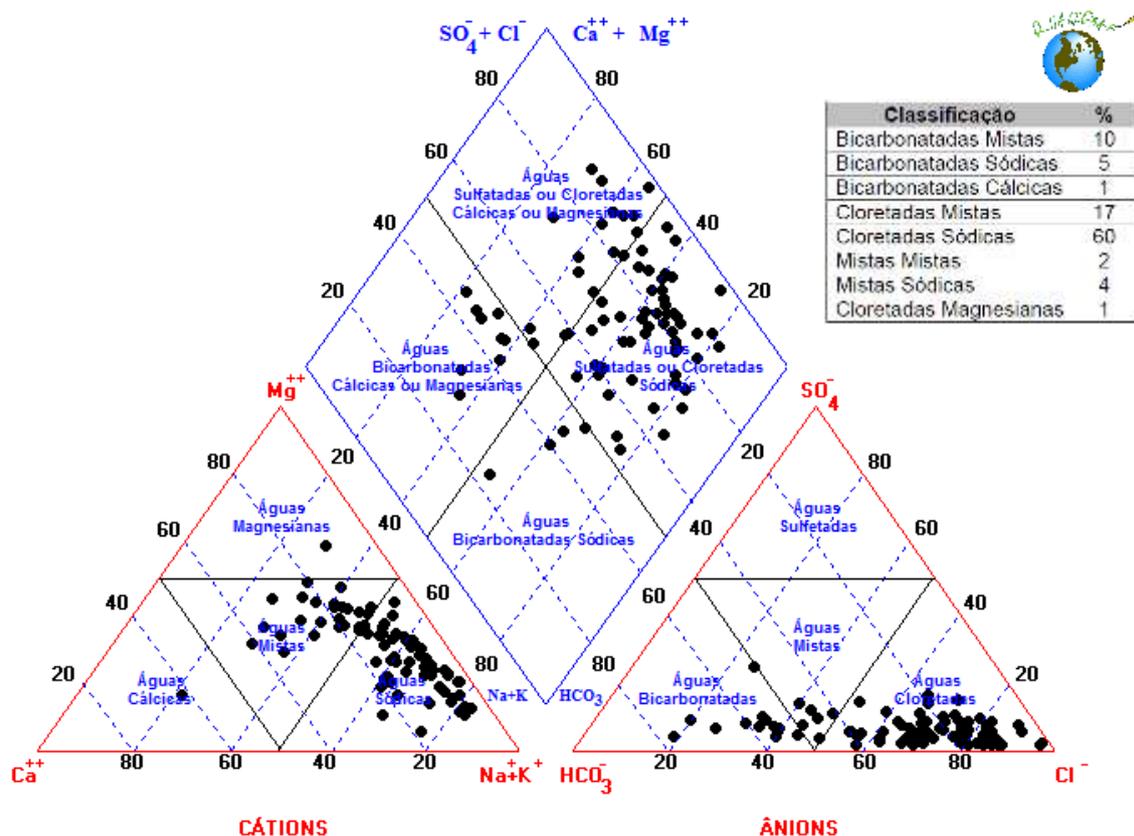
Figura 39 – Mapa de localização dos 82 poços no compartimento sedimentar Tucano



Fonte: O autor.

A Figura 40 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 40 – Diagrama de Piper com os 82 poços localizados no compartimento sedimentar Tucano



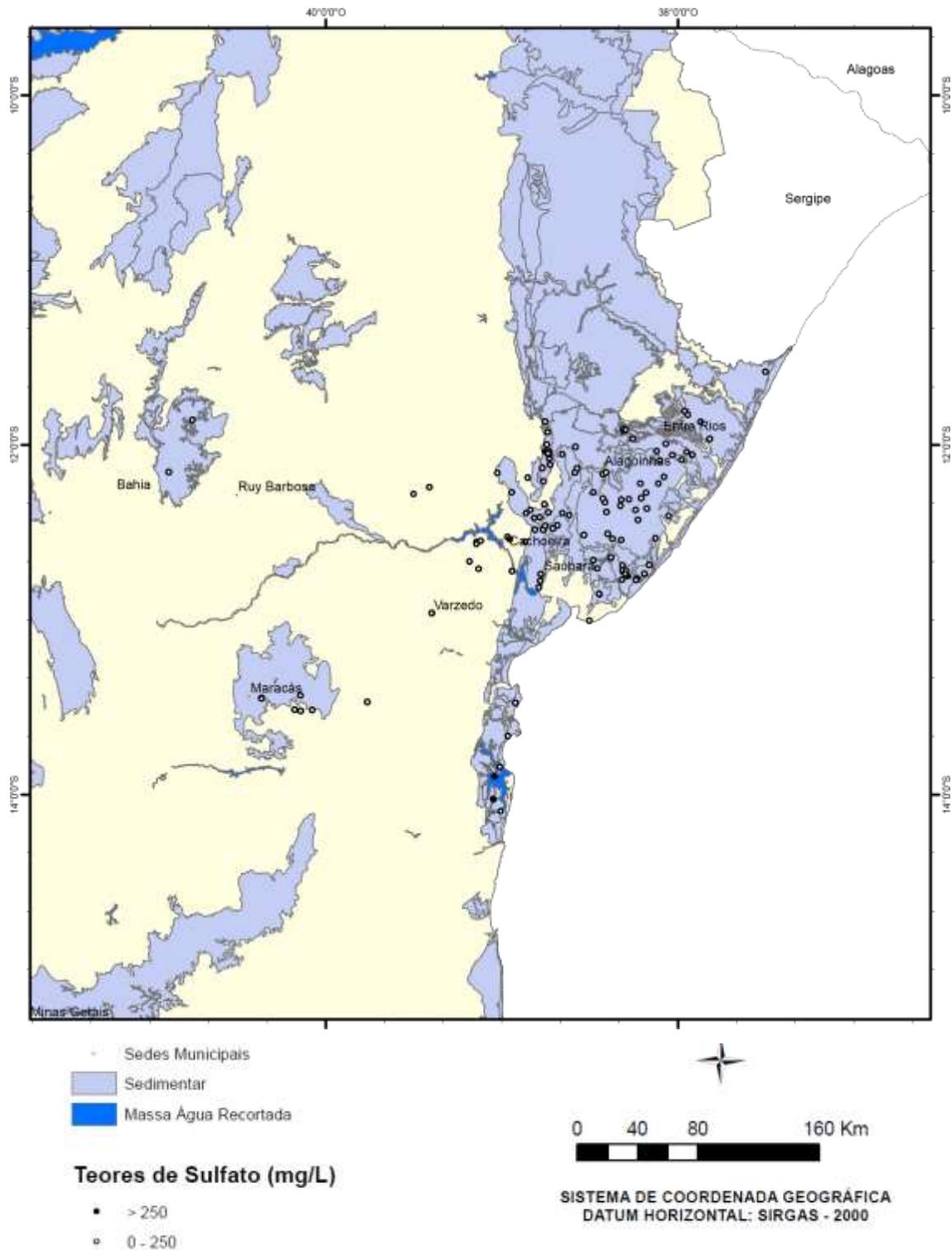
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 40 possibilitou verificar as características hidroquímicas, indicando que as águas das 82 amostras localizadas no compartimento sedimentar tucano se classificam predominantemente como: 60% cloretadas sódicas, 17% cloretadas mistas, 10% bicarbonatadas mistas, entre outros percentuais menores. Quanto à única amostra enriquecida em sulfato, que faz parte do conjunto das 82 amostras analisadas, classifica-se como cloretada mista.

- Compartimento Sedimentar Recôncavo - Camamu

A Figura 41 apresenta os 124 poços distribuídos no compartimento Recôncavo - Camamu, sendo que desse total apenas 3 poços estão enriquecidos em sulfato.

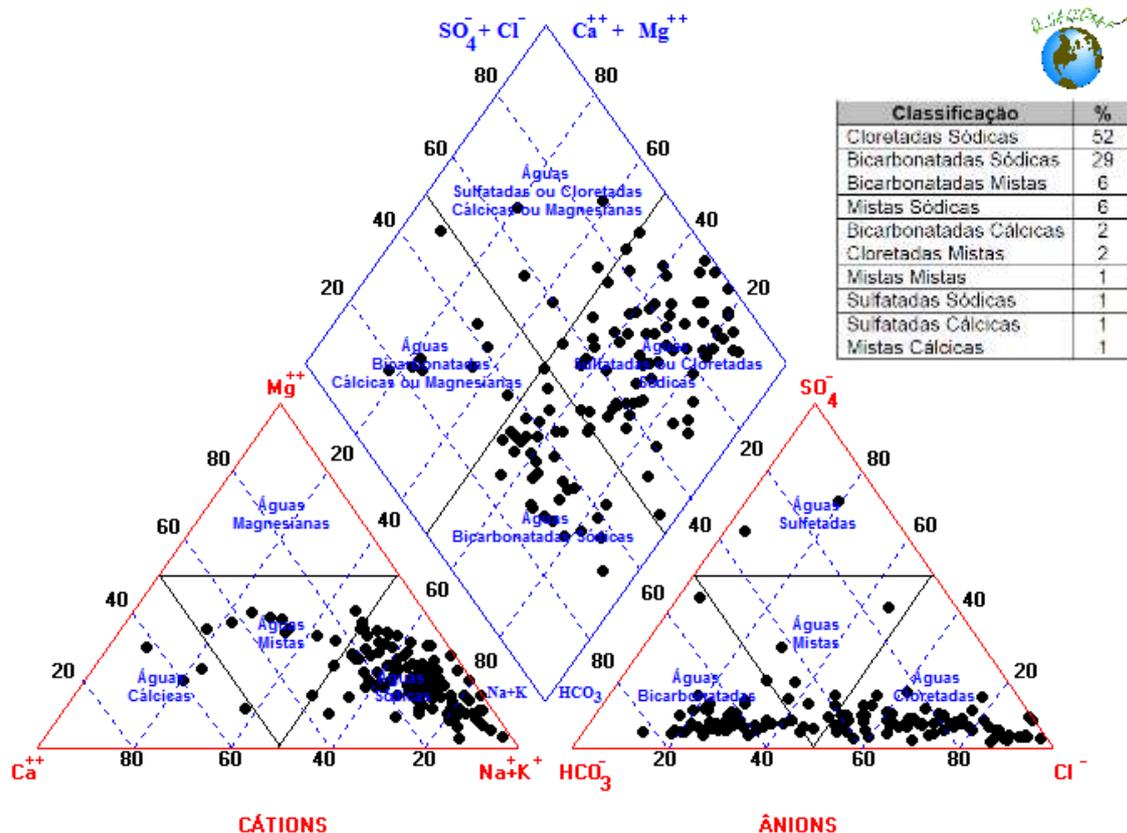
Figura 41 – Mapa de localização dos 124 poços no compartimento sedimentar Recôncavo - Camamu



Fonte: O autor.

A Figura 42 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 42 – Diagrama de Piper com os 124 poços localizados no compartimento sedimentar Recôncavo - Camamu



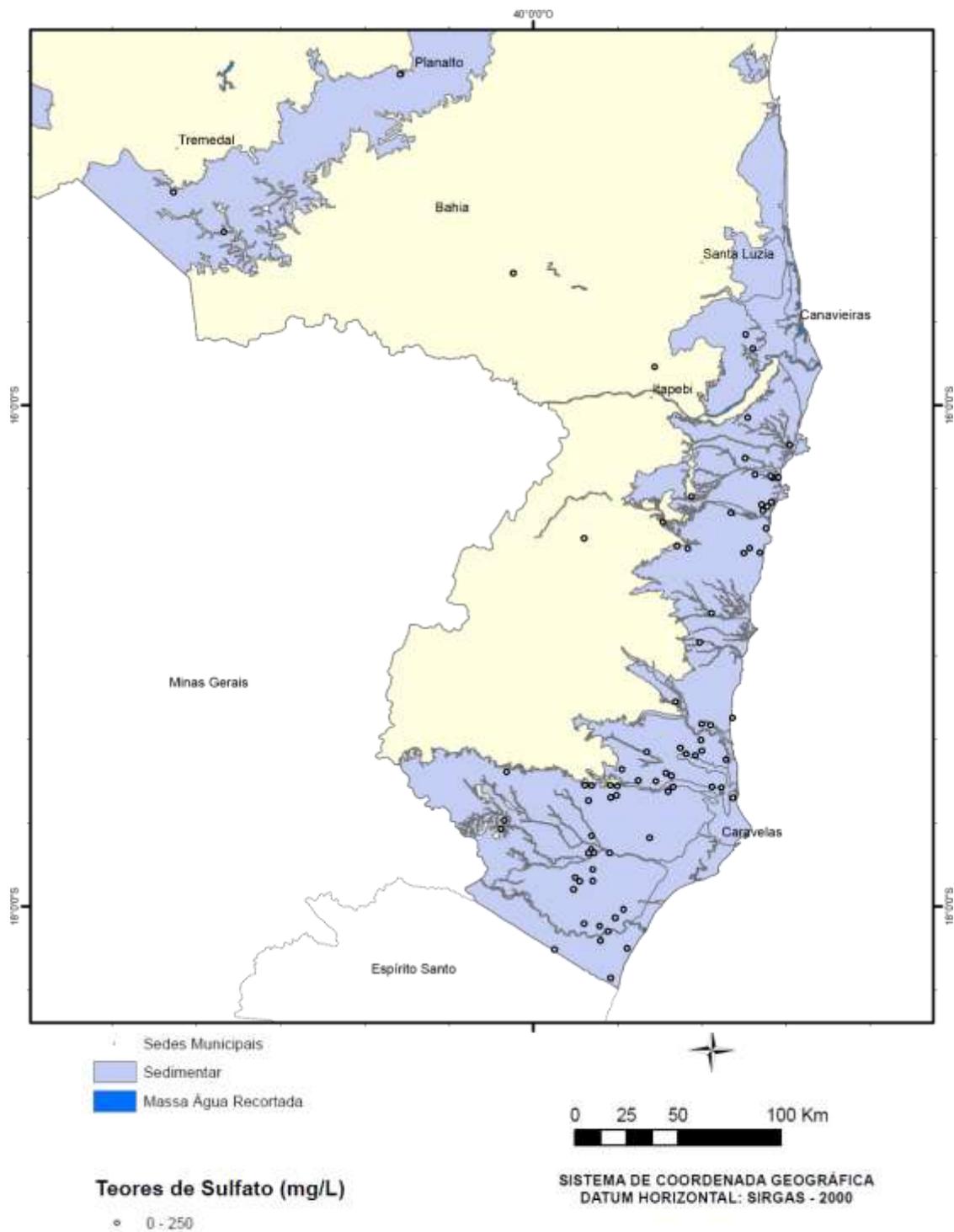
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 42 possibilitou verificar as características hidroquímicas, indicando que as águas das 124 amostras localizadas no compartimento sedimentar Recôncavo Camamu se classificam predominantemente como: 52% cloretadas sódicas, 29% bicarbonatadas sódicas, entre outros percentuais menores. Quanto às 3 amostras enriquecidas em sulfato, que fazem parte do conjunto das 124 amostras analisadas, observou-se que estas são classificadas como sulfatada sódica, sulfatada cálcica e cloretada sódica.

- Compartimento Sedimentar Litoral Sul

A Figura 43 apresenta os 83 poços com teores de sulfato abaixo de 250 mg L^{-1} , distribuídos no compartimento Litoral Sul. Este compartimento não contribui com poços com teor elevado de sulfato.

Figura 43 – Mapa de localização dos 83 poços no compartimento sedimentar Litoral Sul

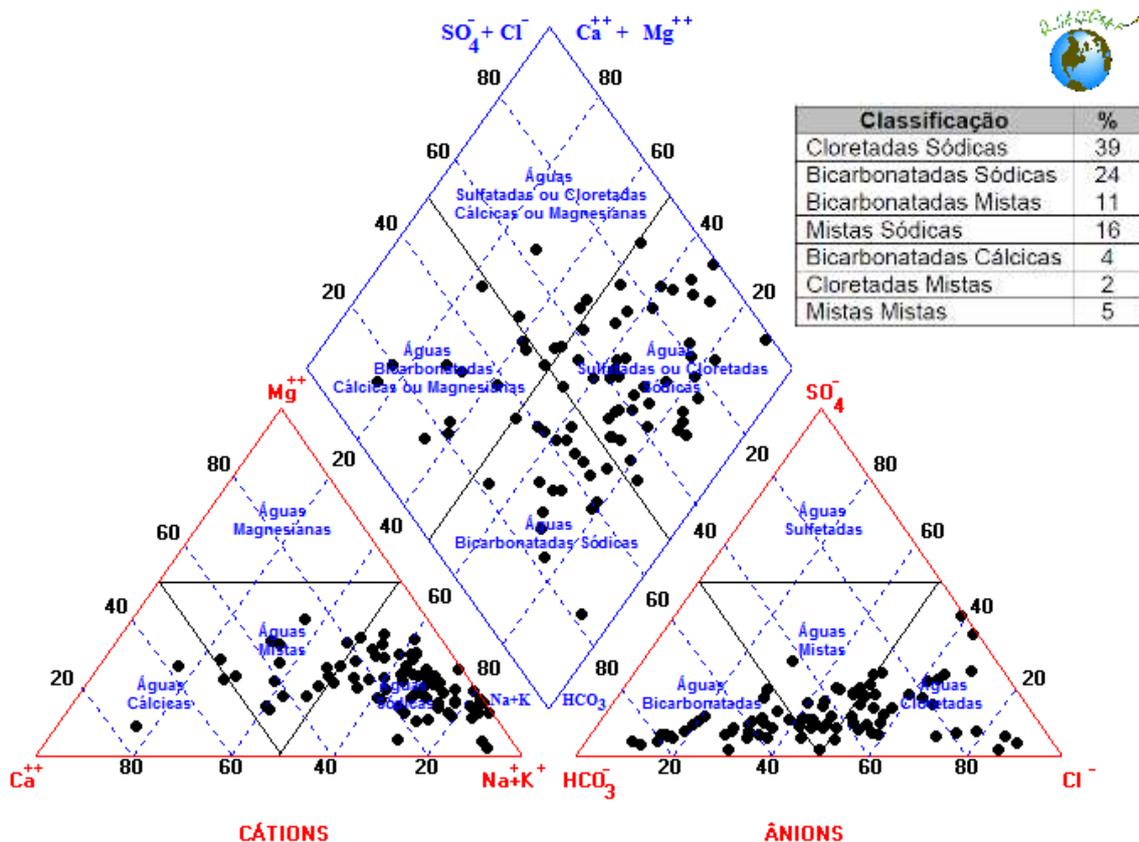


Fonte: O autor.

Com relação ao clima, trata-se de uma região submetida aos climas úmido e subúmido.

A Figura 44 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 44 – Diagrama de Piper com os 83 poços localizados no compartimento sedimentar Litoral Sul



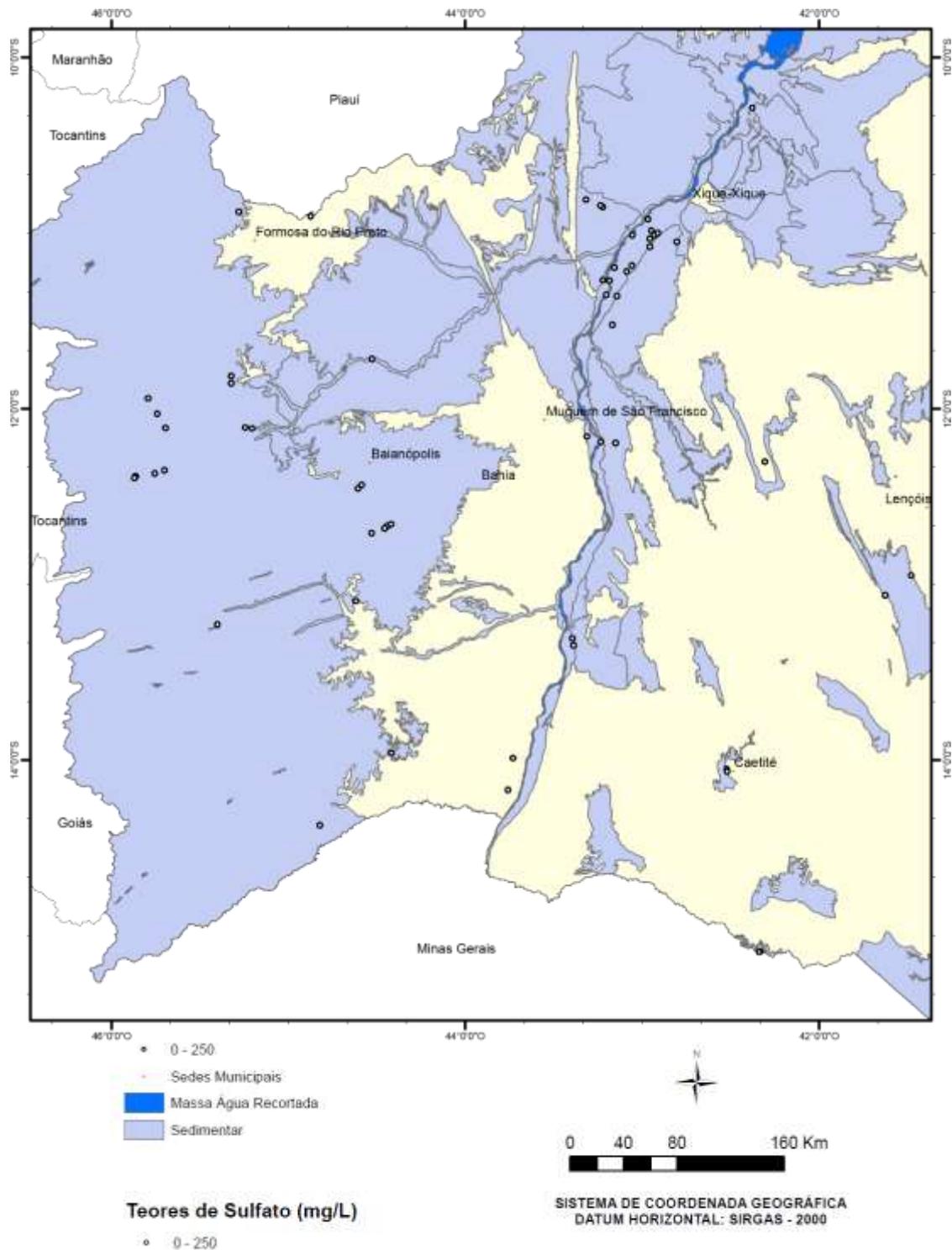
Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 44 possibilitou verificar as características hidroquímicas, indicando que as águas das 83 amostras localizadas no compartimento sedimentar Litoral Sul se classificam predominantemente como: 39% cloretadas sódicas, 24% bicarbonatadas sódicas, 16% mistas sódicas, 11% bicarbonatadas mistas, entre outros percentuais menores.

- Compartimento Sedimentar Urucuia

O mapa da Figura 45 apresenta a localização dos 61 poços com teores de sulfato abaixo de 250 mg L^{-1} , distribuídos no compartimento Urucuia. Este compartimento também não apresenta poço enriquecido em sulfato.

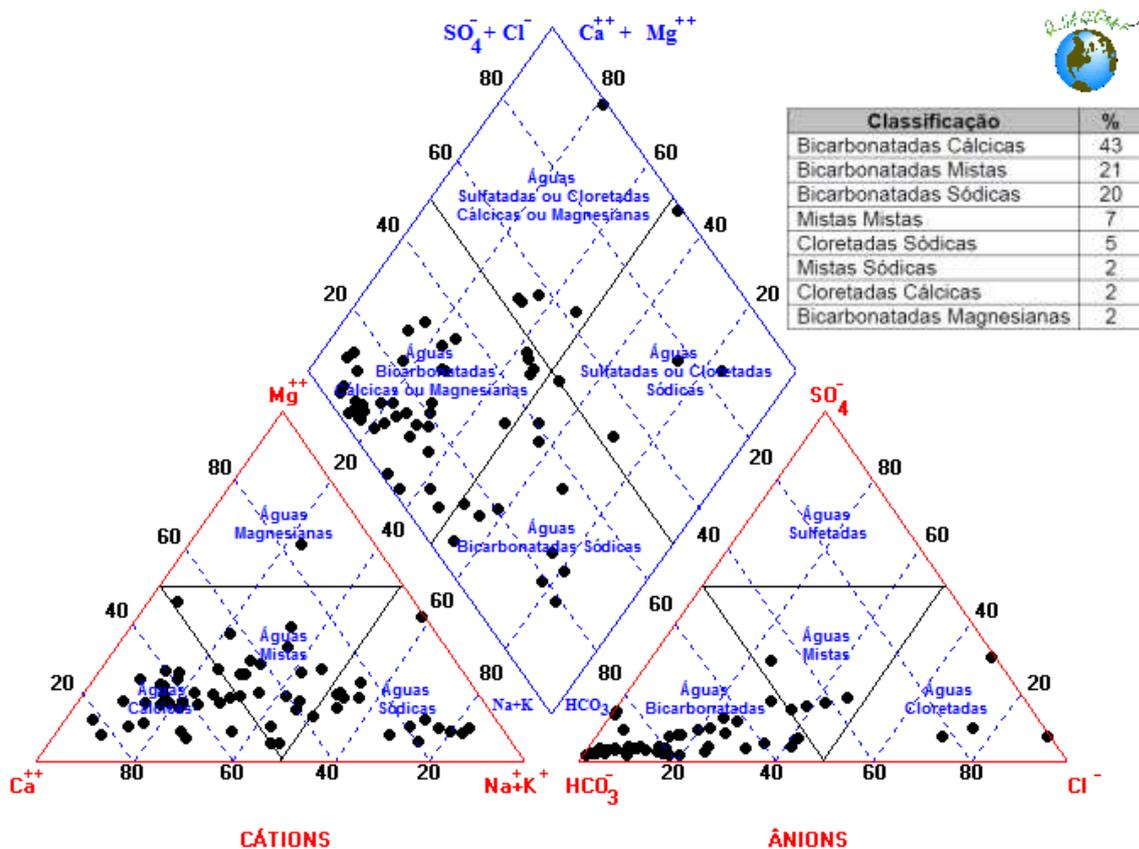
Figura 45 – Mapa de localização dos 61 poços no compartimento sedimentar Urucuia



Fonte: O autor.

A Figura 46 mostra o diagrama de Piper, o qual apresenta as características hidroquímicas da água subterrânea deste compartimento.

Figura 46 – Diagrama de Piper com os 61 poços localizados no compartimento sedimentar Uruçuia



Fonte: O autor.

O diagrama de Piper da Figura 46 indica que as características hidroquímicas das águas das 61 amostras do compartimento sedimentar Uruçuia se classificam predominantemente como: 43% bicarbonatadas cálcicas, 21% bicarbonatadas mistas, 20% bicarbonatadas sódicas, entre outros percentuais menores.

- Resumo das Características Hidroquímicas das 2.792 amostras de águas subterrâneas estudadas

O resumo das características hidroquímicas nos diferentes compartimentos dos domínios hidrogeológicos, constante no Quadro 9, aponta que há um predomínio de águas cloretadas mistas, cloretadas cálcicas, bicarbonatada cálcica e bicarbonatada sódica. Ou seja, indica que os cátions predominantes nessas águas são: cálcio e sódio.

Quadro 9 – Resumo das características hidroquímicas, obtidas utilizando o diagrama de PIPER, por compartimento em cada domínio hidrogeológico

	Cristalino Centro - Norte	Cristalino Centro - Sul	Cristalino Sudeste	Calcário Irecê	Calcário Oeste	Metassed. Leste	Metassed. Oeste	Sedimentar Tucano	Sedimentar Recôncavo	Sedimentar Litoral	Sedimentar Urucua
Bicarbonatadas Cálcicas	0%	3%	6%	19%	56%	6%	17%	1%	2%	4%	43%
Bicarbonatadas Magnesianas	0%	2%	1%	2%	1%	2%	3%	0%	0%	0%	2%
Bicarbonatadas Mistas	7%	23%	23%	14%	13%	28%	31%	10%	6%	11%	21%
Bicarbonatadas Sódicas	5%	10%	3%	4%	19%	7%	18%	5%	29%	24%	20%
Cloretadas Cálcicas	0%	1%	7%	15%	1%	1%	2%	0%	0%	0%	2%
Cloretadas Magnesianas	9%	7%	2%	0%	0%	2%	1%	1%	0%	0%	0%
Cloretadas Mistas	50%	40%	41%	13%	1%	22%	11%	17%	2%	2%	0%
Cloretadas Sódicas	23%	10%	6%	3%	0%	23%	7%	60%	52%	39%	5%
Mistas Cálcicas	0%	0%	1%	9%	4%	0%	1%	0%	1%	0%	0%
Mistas Magnesianas	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mistas Mistas	2%	2%	8%	12%	1%	5%	5%	2%	1%	5%	7%
Mistas Sódicas	3%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	4%	6%	16%	2%
Sulfatadas Cálcicas	0%	0%	0%	5%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
Sulfatadas Mistas	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Sulfatadas Sódicas	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Fonte: O autor

6.5. Especiação Química do Sulfato nas Águas Subterrâneas por meio da Aplicação do Método *Tableau*

Após a aplicação do método *Tableau*, através do software MINEQL +[®], foram obtidas as especiações químicas do sulfato e suas respectivas concentrações, para as 289 amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹.

Como foram utilizados, na aplicação do método *Tableau* no software MINEQL +[®], os cátions Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺, os resultados obtidos para a especiação do sulfato foram: CaSO_{4(aq)}, MgSO_{4(aq)}, KSO₄⁻ e NaSO₄⁻. Em relação à concentração de cada espécie obtida, para facilitar na elaboração dos mapas, foi trabalhada a ordem de grandeza, da seguinte forma:

Ordem de grandeza da concentração	Número correspondente
10 ⁻⁷ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁶ mol L ⁻¹	1
10 ⁻⁶ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁵ mol L ⁻¹	2
10 ⁻⁵ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁴ mol L ⁻¹	3
10 ⁻⁴ mol L ⁻¹ a 10 ⁻³ mol L ⁻¹	4
10 ⁻³ mol L ⁻¹ a 10 ⁻² mol L ⁻¹	5
10 ⁻² mol L ⁻¹ a 10 ⁻¹ mol L ⁻¹	6
10 ⁻¹ mol L ⁻¹ a 10 ⁰ mol L ⁻¹	7

A partir desse ponto do trabalho, as concentrações das espécies químicas do sulfato serão tratadas pelo número correspondente, ao invés de colocar a ordem de grandeza da concentração, a fim de facilitar o entendimento do trabalho.

Os resultados obtidos para as concentrações das espécies químicas do sulfato foram praticamente os mesmos, ou seja, apresentaram um padrão de mesma ordem de grandeza, para todos os domínios hidrogeológicos, independentemente do tipo de geologia encontrado em cada domínio e também independente dos índices pluviométricos. Porém, algumas exceções de amostras apresentaram concentrações com ordem de grandeza diferente do padrão apresentado pelas demais amostras e serão detalhadas nos tópicos a seguir.

Em relação aos resultados obtidos para as concentrações da espécie química CaSO_{4(aq)}, todos os resultados apresentaram concentração variando entre 10⁻⁴ mol L⁻¹

1 e 10^{-2} mol L⁻¹. Já as concentrações da espécie química MgSO_{4(aq)} variaram entre 10^{-4} mol L⁻¹ e 10^{-2} mol L⁻¹, porém também apresentou 1 amostra com concentração entre 10^{-7} mol L⁻¹ e 10^{-6} mol L⁻¹, e 4 amostras com concentração entre 10^{-2} mol L⁻¹ e 10^{-1} mol L⁻¹.

A espécie química NaSO₄⁻ apresentou concentrações variando entre 10^{-5} mol L⁻¹ e 10^{-3} mol L⁻¹, sendo que houve 2 amostras com concentração entre 10^{-6} mol L⁻¹ e 10^{-5} mol L⁻¹, bem como 3 amostras com concentração entre 10^{-3} mol L⁻¹ e 10^{-2} mol L⁻¹.

As menores concentrações foram da espécie química KSO₄⁻, que apresentou concentrações variando entre 10^{-7} mol L⁻¹ e 10^{-6} mol L⁻¹, a exceção de 12 amostras que apresentou concentração entre 10^{-5} mol L⁻¹ e 10^{-4} mol L⁻¹.

Em resumo do que foi exposto nos dois parágrafos anteriores, visto que as concentrações das espécies de sulfato serão tratadas a partir daqui pelo número correspondente, as concentrações das espécies químicas variaram da seguinte maneira:

CaSO_{4 (aq)} variou entre 4 e 5

MgSO_{4 (aq)} variou entre 4 e 5 com exceções 1 e 6

NaSO₄⁻ variou entre 3 e 4 com exceções 2 e 5

KSO₄⁻ variou entre 1 e 2 com exceção 3

Dessa forma, observa-se que as maiores concentrações foram das espécies químicas CaSO_{4 (aq)} e MgSO_{4 (aq)}, o que era de se esperar conforme a revisão bibliográfica, já que, de acordo com Freeze e Cherry (1979), os constituintes maiores das águas subterrâneas são o cálcio e magnésio, dentre outros. Ainda segundo esses autores, o sódio também é considerado dentro da categoria de constituintes maiores, e foi verificado na especiação que após o cálcio e magnésio, as concentrações de NaSO₄⁻ seguiam logo atrás, em termo de ordem de grandeza. Na classificação dos autores mencionados, o potássio encontra-se como constituinte menor e a especiação corroborou essa informação, pois as menores concentrações obtidas foram para a espécie KSO₄⁻.

Em relação à influência da pluviosidade na concentração das espécies químicas de sulfato, observou-se que para os poços que estavam sob o mesmo domínio geológico-ambiental e com índices pluviométricos distintos, essa variação da pluviosidade não foi indicativa para a diferença nas concentrações obtidas. Ora poços que

apresentaram maior pluviosidade também apresentaram maiores concentrações para algumas espécies do sulfato, ora apresentaram menores concentrações para as espécies do sulfato.

Ainda de acordo com a revisão bibliográfica, sabe-se que as águas de precipitação não são fonte de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e sim que estes são provenientes do intemperismo causado pelo contato água/rocha. Portanto, visto que as maiores concentrações encontradas foram para as espécies CaSO_4 (aq) e MgSO_4 (aq), verifica-se que a geologia tem uma influência maior sobre a composição química dessas águas do que a pluviosidade.

Águas de mesma litologia, de uma mesma região, geralmente têm características comuns, mas não terão obrigatoriamente a mesma composição química porque sofrem influências diferentes como a zona de alimentação, o trajeto, clima, etc. Além disso, águas de dois aquíferos diferentes, situados na mesma região, mesmo estando próximos, podem ter composição química diferente.

Os resultados da determinação das concentrações das espécies químicas do sulfato nas águas subterrâneas das 289 amostras enriquecidas em sulfato estão nas tabelas apresentadas no Apêndice D, bem como foram plotados em mapas, de acordo com as concentrações, e apresentados no Apêndice E.

Serão abordadas, nos itens a seguir, apenas as amostras que apresentaram concentrações diferentes (exceção) dos resultados referentes ao padrão da ordem de grandeza das concentrações das espécies químicas CaSO_4 (aq), MgSO_4 (aq), NaSO_4^- e KSO_4^- , de uma forma geral, para todas as amostras dos diversos domínios geológico-ambientais.

6.5.1. Domínio das Rochas Sedimentares

Somente 4 amostras do domínio das rochas sedimentares estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L^{-1} , e o Quadro 10 contém os resultados da especiação, com base no número correspondente à ordem de grandeza das concentrações em mol L^{-1} , da única amostra que apresentou os resultados das concentrações diferente do padrão de resultado encontrado nas demais amostras do domínio sedimentar.

Quadro 10 – Especificação química do sulfato do domínio sedimentar

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade (mm)	Domínio Geológico
22102	ARACI	5	3	6	5	600	DSMqcg

Fonte: O autor.

A amostra de Araci apresentou concentração de KSO₄⁻ variando entre 10⁻⁵ mg L⁻¹ a 10⁻⁴ mg L⁻¹, concentração de MgSO_{4(aq)} variando entre 10⁻² mg L⁻¹ a 10⁻¹ mg L⁻¹ e concentração de NaSO₄⁻ variando entre 10⁻³ mg L⁻¹ a 10⁻² mg L⁻¹, sendo todas essas concentrações exceções aos padrões dos resultados de concentração das espécies, encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das sequências sedimentares mesozóicas clasto-carbonáticas consolidadas em bacias de margem continentais (rift), caracterizadas pelo predomínio de sedimentos quartzo-arenosos e conglomeráticos, com intercalações de sedimentos síltico-argilosos e/ou calcíferos (DSMqcg).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: folhelho pirobetuminoso, turfa, urânio, argila, areia, caulim, ardósia, calcário, fosfato, barita, carvão, gipsita e evaporitos. Ocorre liberação de cálcio e magnésio para as águas, bem como excesso de alumínio e quantidade apreciável de sódio.

Nas águas de calcários há o predomínio do Ca²⁺ sobre o Mg²⁺ e Na⁺. Já as águas de gipso possuem teores extremamente elevados em Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺. Em águas que contém argila os teores de Na⁺ predominam sobre Ca²⁺ e Mg²⁺. Os folhelhos contêm muito Na⁺. Em águas de areias e arenitos, os teores em Na⁺ e Mg²⁺ são superiores aos das águas de calcários, e os íons Ca²⁺ encontram-se em pequenas quantidades. Os evaporitos possuem composição mineralógica incluindo carbonatos de sódio e cálcio, com quantidades menores de sais de potássio e magnésio.

Dessa forma, entende-se o porquê das quantidades de magnésio, sódio e potássio serem mais elevadas nesse domínio geológico ambiental.

6.5.2. Domínio das Rochas Metassedimentares

Neste domínio todas as 26 amostras, que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹, apresentaram as concentrações das espécies químicas do

sulfato conforme o padrão geral encontrado para as concentrações das espécies químicas em todos os domínios hidrogeológicos, independentemente do tipo de geologia encontrado em cada domínio estudado.

As concentrações das espécies de sulfato no domínio metassedimentar variaram da seguinte maneira, em relação à ordem de grandeza das concentrações:

- $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ entre 10^{-4} mg L⁻¹ e 10^{-2} mg L⁻¹
- $\text{MgSO}_{4(\text{aq})}$ entre 10^{-4} mg L⁻¹ e 10^{-2} mg L⁻¹
- NaSO_4^- entre 10^{-5} mg L⁻¹ e 10^{-3} mg L⁻¹
- KSO_4^- entre 10^{-7} mg L⁻¹ e 10^{-5} mg L⁻¹

6.5.3. Domínio das Rochas Calcárias

O domínio das rochas calcárias está subdividido em oeste e Irecê, conforme já foi apresentado ao longo deste trabalho. Na subdivisão calcário oeste, todas as 6 amostras, que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹, apresentaram as concentrações das espécies químicas do sulfato conforme o padrão geral encontrado para as concentrações das espécies químicas em todos os domínios hidrogeológicos, independentemente do tipo de geologia encontrado em cada domínio estudado.

As concentrações das espécies de sulfato no domínio calcário oeste variaram da seguinte maneira, em relação à ordem de grandeza das concentrações:

- $\text{CaSO}_{4(\text{aq})}$ entre 10^{-4} mg L⁻¹ e 10^{-2} mg L⁻¹
- $\text{MgSO}_{4(\text{aq})}$ entre 10^{-4} mg L⁻¹ e 10^{-2} mg L⁻¹
- NaSO_4^- entre 10^{-5} mg L⁻¹ e 10^{-3} mg L⁻¹
- KSO_4^- entre 10^{-7} mg L⁻¹ e 10^{-5} mg L⁻¹

Na subdivisão calcário Irecê, das 43 amostras que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹, somente 2 amostras apresentaram os resultados das concentrações diferente do padrão de resultado encontrado para a ordem de grandeza das concentrações das espécies químicas nas demais amostras dos diversos domínios geológico-ambientais. O Quadro 11 contém os resultados da especiação, com base no número correspondente à ordem de grandeza das concentrações em mol L⁻¹, dessas 2 amostras.

Quadro 11 – Especificação química do sulfato do domínio calcário Irecê

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Parte 1							
22077	CAFAR-NAUM	4	1	4	2	600	DSP1csaa
Parte 2							
22199	VÁRZEA NOVA	5	3	5	4	500	DCDL

Fonte: O autor.

A amostra de Cafarnaum apresentou concentração de NaSO₄⁻ variando entre 10⁻⁶ mg L⁻¹ e 10⁻⁵ mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das coberturas sedimentares proterozóicas, não ou muito pouco dobradas e metamorfizadas, caracterizadas por um empilhamento de camadas horizontalizadas e sub-horizontalizadas de várias espessuras, de sedimentos clasto-químicos de várias composições, associados aos mais diferentes ambientes tectono-deposicionais, caracterizadas por rochas calcárias com intercalações subordinadas de sedimentos siltico-argilosos e arenosos (DSP1csaa).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: ardósia, arenito, calcário, quartizitos, diamante, ferro, manganês, cobre, chumbo, zinco e prata.

Nas águas de calcários há o predomínio do Ca²⁺ sobre o Mg²⁺ e Na⁺. E como nesse domínio existem pequenas quantidades de areia e argila, nas águas de areias e arenitos, os teores em Na⁺ e Mg²⁺ são superiores aos das águas de calcários, e os íons Ca²⁺ encontram-se em pequenas quantidades. Já em águas que contém argila, as argilas sódicas trocam íons de Na⁺ por íons de Ca²⁺ e Mg²⁺ da água e as argilas cálcicas trocam íons de Ca²⁺ por íons de Na⁺ e Mg²⁺.

Dessa forma, como se observa um predomínio de rochas calcárias com pequenas quantidades de sedimentos siltico-argilosos e arenosos, entende-se o porquê de a quantidade de sódio ser menor nesse domínio geológico ambiental, visto que a influência das areias e argilas é menor, pois as rochas calcárias estão em maiores proporções.

Em relação à amostra de Várzea Nova, esta apresentou concentração de KSO₄⁻ variando entre 10⁻⁵ mg L⁻¹ e 10⁻⁴ mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados

de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das coberturas cenozoicas detrítico-lateríticas, caracterizadas por depósitos detrítico-lateríticos provenientes de processos de lateritização em rochas de composições diversas sem a presença de crosta (DCDL).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: ouro laterítico, quartzo aurífero, manganês, ferro, estanho laterítico e cascalheira. Ocorre ainda solos à base de caulinita com altas concentrações de ferro e alumínio.

Esse domínio contém solos à base de caulinita, mineral secundário que apresenta teores de minerais primários fontes de potássio (micas e feldspatos), e mesmo sendo um mineral secundário representa importante fonte de potássio. Por esse motivo, o teor de potássio foi um pouco mais elevado do que nas amostras em geral.

6.5.4. Domínio das Rochas Cristalinas

O domínio das rochas cristalinas está subdividido em cristalino norte, cristalino sul e cristalino sudeste, conforme já foi apresentado ao longo deste trabalho. Na subdivisão cristalino sudeste, das 23 amostras que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹, somente 2 amostras apresentaram os resultados das concentrações diferente do padrão de resultado encontrado para a ordem de grandeza das concentrações das espécies químicas nas demais amostras dos diversos domínios geológico-ambientais. O Quadro 12 contém os resultados da especiação dessas 2 amostras, com base no número correspondente à ordem de grandeza das concentrações em mol L⁻¹.

Quadro 12 – Especiação química do sulfato do domínio cristalino sudeste

Nº da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Parte 1							
22505	TREMEDAL	5	3	4	4	800	DCGMGLmo
22863	TREMEDAL	4	3	4	3	800	DCGMGLmo

Fonte: O autor.

Ambas as amostras estão no município de Tremedal e apresentaram concentração de KSO₄⁻ variando entre 10⁻⁵ mg L⁻¹ e 10⁻⁴ mg L⁻¹, exceções aos resultados encontrados de uma forma geral. Essas amostras estão localizadas no domínio

geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por um predomínio de migmatitos ortoderivados. (DCGMGLmo).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Além disso, a vermiculita, o feldspato (alcalino) e a mica também são fornecedores de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

Na subdivisão cristalino sul, das 37 amostras que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L^{-1} , somente 3 amostras apresentaram os resultados das concentrações diferente do padrão de resultado encontrado para a ordem de grandeza das concentrações das espécies químicas nas demais amostras dos diversos domínios geológico-ambientais. O Quadro 13 contém os resultados da especiação dessas 3 amostras, com base no número correspondente à ordem de grandeza das concentrações em mol L^{-1} .

Quadro 13 – Especiação química do sulfato do domínio cristalino sul

Nº da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Parte 1							
17698	IRAMAIA	5	3	5	4	600	DCGR2salc
22633	MARACÁS	5	2	6	4	600	DCMUmu
Parte 2							
19593	ITORORÓ	5	3	5	4	900	DCGMGLgno

Fonte: O autor.

A amostra de Iramaia apresentou concentração de KSO₄⁻ variando entre $10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos complexos granitoides deformados, caracterizadas por séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto - K) (DCGR2salc).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por rochas granitoides intrusivas, representadas pelas litologias: granito, monzonito, granodiorito, tonalito, chanockito e diorito. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: fosfato, água marinha, quartzo hialino, wolframita, bário, ouro e diamante.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Itororó apresentou concentração de KSO_4^- variando entre 10^{-5} mg L⁻¹ e 10^{-4} mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses ortoderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgno).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Além disso, a vermiculita, o feldspato (alcalino) e a mica também são fornecedores de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Maracás apresentou concentração de MgSO_4 (aq) variando entre 10^{-2} mg L⁻¹ e 10^{-1} mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos corpos máfico-ultramáficos (suítes komatiliticas, suítes toleíticas, complexos bandados), caracterizados por série máfico-ultramáfica (dunito, peridotito etc.) (DCMUmu).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por mineralogia à base de feldspato e minerais ferromagnesianos, diorito, gabro, diabásio, peridotito, dunito, piroxenito, talco-xistos e cromitito. Também se caracteriza por possuir um potencial para os

seguintes recursos minerais: minerais ferrosos, não ferrosos, gemas, cromita, esmeralda (flogopititos, plagioclasitos e pegmatitos), cobre, talco, amianto, ouro, Fe-Ti-V, cromo, níquel e manganês.

Devido à tendência dos minerais ferromagnesianos nesse domínio, ocorre a liberação do magnésio para as águas. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de magnésio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

Na subdivisão cristalino norte, das 150 amostras que estavam com concentração de sulfato acima do limite de 250 mg L⁻¹, somente 12 amostras apresentaram os resultados das concentrações diferente do padrão de resultado encontrado para a ordem de grandeza das concentrações das espécies químicas nas demais amostras dos diversos domínios geológico-ambientais. O Quadro 14 contém os resultados da especiação dessas 12 amostras, com base no número correspondente à ordem de grandeza das concentrações em mol L⁻¹.

Quadro 14 – Especiação química do sulfato do domínio cristalino norte

Nº da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Parte 1							
20751	ABARÉ	5	2	5	5	500	DCGMGLgnp
22889	ABARÉ	5	2	4	5	500	DCGMGLgnp
21580	MONTE SANTO	5	2	1	4	600	DCGMGLgno
22811	CANUDOS	5	2	6	4	600	DCMUmu
Parte 2							
21899	JACOBINA	5	3	4	4	700	DCDL
18075	JAGUARARÍ	4	2	5	2	700	DCGMGLgnp
23283	ITIÚBA	5	3	5	4	600	DCAsbalc
17872	JUAZEIRO	5	3	5	4	500	DCDC
Parte 3							
23162	SANTA LUZ	5	3	5	4	600	DGBvai
19975	S. GONÇ.DOS CAMPOS	5	3	5	4	1200	DCGMGLgno
21518	SANTA LUZ	5	2	6	4	600	DCGR3salc
23163	SANTA LUZ	5	3	5	4	600	DCGR3salc

Fonte: O autor.

A amostra de Jacobina apresentou concentração de KSO₄⁻ variando entre 10⁻⁵ mg L⁻¹ e 10⁻⁴ mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa

amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das coberturas cenozoicas detrito-lateríticas, caracterizadas por depósitos detrito-lateríticos provenientes de processos de lateritização em rochas de composições diversas sem a presença de crosta (DCDL).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: ouro laterítico, quartzo aurífero, manganês, ferro, estanho laterítico e cascalheira. Ocorre ainda solos à base de caulinita com altas concentrações de ferro e alumínio.

Esse domínio contém solos à base de caulinita, mineral secundário que apresenta teores de minerais primários fontes de potássio (micas e feldspatos), e mesmo sendo um mineral secundário representa importante fonte de potássio. Por esse motivo, o teor de potássio foi um pouco mais elevado do que nas amostras em geral.

A amostra de Itiúba apresentou concentração de KSO_4^- variando entre 10^{-5} mg L⁻¹ e 10^{-4} mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos complexos alcalinos intrusivos e extrusivos, diferenciados do terciário, mesozóico e proterozóico, caracterizadas por série subalcalina (monzonitos, quartzomonzonitos, mangeritos etc.) (DCAsbalc).

Esse domínio geológico-ambiental apresenta rochas cristalinas e mineralogia à base de feldspato e quartzo, representada por monzonitos, mangeritos, sienitos, traquilitos e gnaisses. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, fosfato, areia, cobre, sodalita, rochas graníticas e sieníticas.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Além disso, o feldspato (alcalino) também é fornecedor de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Juazeiro apresentou concentração de KSO_4^- variando entre 10^{-5} mg L⁻¹ e 10^{-4} mg L⁻¹, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das coberturas cenozoicas

detrítico-carbonáticas, caracterizadas por depósitos detrítico-carbonáticos provenientes de processos de lateritização em rochas carbonáticas (DCDC).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por rochas calcárias (carbonato de cálcio e magnésio). Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: mármore bege e cal.

Nas águas de calcários há o predomínio do Ca^{2+} sobre o Mg^{2+} e Na^+ . Não existe uma razão geológica aparente para esse domínio ter apresentado um teor de potássio mais elevado do que os encontrados de maneira geral. Talvez possa ser atribuído à influências de litologias circunvizinhas.

A amostra de Santa Luz (Nº da amostra 23162) apresentou concentração de KSO_4^- variando entre $10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental das sequências vulcanossedimentares tipo greenstone belt, arqueano ao mesoproterozóico, caracterizadas por sequência vulcanossedimentar, com alta participação de metavulcânicas ácidas e intermediárias (DGBvai).

Esse domínio geológico-ambiental está representado por metassedimentos síltico-argilosos, arenosos, formações ferríferas, calcários, rochas vulcânicas básicas, ultrabásicas ácidas e intermediárias, formações ferro-manganesíferas e rochas cloritaxistas. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: ouro, magnetita, talco, Pb-Zn-Ag, quartizitos, anfíbolitos, mármore, xistos, barita, chert, manganês, diamante, cristal de rocha, cobre, ferro e turmalina.

A presença de xistos, rochas ricas em potássio, bem como os anfíbolitos, que contém biotita e óxido de potássio na sua composição, explicam o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Santa Luz (Nº da amostra 23163) apresentou concentração de KSO_4^- variando entre $10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos complexos granitoides intensamente deformados: ortognaisses, caracterizados por séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto - K) (DCGR3salc).

Esse domínio geológico-ambiental apresenta charnockitos, enderbitos, metadioritos, metagranitos, metagranodioritos, augengnaisses. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: minerais ferrosos, não-ferrosos, gemas, manganês, amianto, granito, quartzo, feldspato, areia, grafita, ametista, bário, brita, ouro, esmeralda, vermiculita, mármore, calcário, quartizito e argila.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Além disso, a vermiculita e o feldspato (alcalino) também são fornecedores de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de São Gonçalo dos Campos apresentou concentração de KSO_4^- variando entre $10^{-5} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-4} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses ortoderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgno).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio. Além disso, a vermiculita, o feldspato (alcalino) e a mica também são fornecedores de potássio. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de potássio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Monte Santo apresentou concentração de MgSO_4 (aq) variando entre $10^{-7} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-6} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses ortoderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgno).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos calcários, os íons Ca^{2+} predominam sobre os íons Mg^{2+} e Na^+ . Os feldspatos alcalinos são fornecedores de Na^+ e K^+ e os feldspatos cálcicos são fornecedores de Ca^{2+} . Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de magnésio ser menor nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Canudos apresentou concentração de MgSO_4 (aq) variando entre 10^{-2} mg L^{-1} e 10^{-1} mg L^{-1} , sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos corpos máfico-ultramáficos (suítes komatílicas, suítes toleíticas, complexos bandados), caracterizados por série máfico-ultramáfica (dunito, peridotito etc.) (DCMUmu).

Esse domínio geológico-ambiental caracteriza-se por mineralogia à base de feldspato e minerais ferromagnesianos, diorito, gabro, diabásio, peridotito, dunito, piroxenito, talco-xistos e cromitito. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: minerais ferrosos, não ferrosos, gemas, cromita, esmeralda (flogopititos, plagioclasitos e pegmatitos), cobre, talco, amianto, ouro, Fe-Ti-V, cromo, níquel e manganês.

Devido à tendência dos minerais ferromagnesianos nesse domínio, ocorre a liberação do magnésio para as águas. Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de magnésio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Santa Luz (N° da amostra 21518) apresentou concentração de MgSO_4 (aq) variando entre 10^{-2} mg L^{-1} e 10^{-1} mg L^{-1} , sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental dos complexos granitoides intensamente deformados: ortognaisses, caracterizados por séries graníticas cálcio - alcalinas (baixo, médio e alto - K) (DCGR3salc).

Esse domínio geológico-ambiental apresenta charnockitos, enderbitos, metadioritos, metagranitos, metagranodioritos, augengnaisses. Também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: minerais ferrosos, não-ferrosos,

gemas, manganês, amianto, granito, quartzo, feldspato, areia, grafita, ametista, bário, brita, ouro, esmeralda, vermiculita, mármore, calcário, quartzito e argila.

Nas águas de areias e arenitos os teores em Mg^{2+} e Na^+ são superiores aos das águas de calcários. Os íons Ca^{2+} encontram-se em menores quantidades do que Mg^{2+} . Bem como, água de argilas sódicas trocam íons de Na^+ por íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} da água e as argilas cálcicas trocam íons de Ca^{2+} por íons de Na^+ e Mg^{2+} . Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de magnésio ter se apresentado mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Abaré (Nº da amostra 20751) apresentou concentração de $NaSO_4^-$ variando entre $10^{-3} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-2} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses paraderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgnp).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição do plagioclásio produz liberação de sódio. Além disso, o feldspato (alcalino) também é fornecedor de íons Na^+ . Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de sódio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Abaré (Nº da amostra 22889) apresentou concentração de $NaSO_4^-$ variando entre $10^{-3} \text{ mg L}^{-1}$ e $10^{-2} \text{ mg L}^{-1}$, sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses paraderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgnp).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito,

mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição do plagioclásio produz liberação de sódio. Além disso, o feldspato (alcalino) também é fornecedor de íons Na^+ . Dessa forma, entende-se o porquê de a quantidade de sódio ter se apresentado um pouco mais elevada nesse domínio geológico ambiental.

A amostra de Jaguarari apresentou concentração de NaSO_4^- variando entre 10^{-6} mg L^{-1} e 10^{-5} mg L^{-1} , sendo exceção aos resultados encontrados de uma forma geral. Essa amostra está localizada no domínio geológico-ambiental do complexo granito-gnaiss-migmatítico e granulitos, caracterizado por predomínio de gnaisses paraderivados que podem ou não conter porções migmatíticas (DCGMGLgnp).

Esse domínio geológico-ambiental também se caracteriza por possuir um potencial para os seguintes recursos minerais: urânio, amianto, fosfato, gnaisses, sienito, mármore, calcário, água marinha, vermiculita, cromo, feldspato, cianita, mica, córindon, bário, grafita, granada, cobre, ouro, manganês e esmeralda.

Nas águas dos granitos, cujos minerais constituintes são quartzo, ortoclásio, plagioclásio, biotita e muscovita, a decomposição dos minerais ortoclásio, biotita e muscovita produz liberação de potássio, e apenas a decomposição do plagioclásio produz liberação de sódio. Além disso, os feldspatos alcalinos são fornecedores de Na^+ e K^+ e os feldspatos cálcicos são fornecedores de Ca^{2+} . Como também, a vermiculita e a mica são fornecedores de potássio. Nas águas dos calcários, os íons Ca^{2+} predominam sobre os íons Mg^{2+} e Na^+ . Dessa forma, percebe-se que no município de Jaguarari devem predominar as litologias fontes de Ca^{2+} e Mg^{2+} e entende-se o porquê de a quantidade de sódio ter se apresentado um pouco menor nesse domínio geológico ambiental.

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados desse trabalho, foi possível concluir que:

- Do total de 2.792 amostras de águas subterrâneas, de poços perfurados no período de 2003 a 2013, estudados neste trabalho, 10% dessas águas (289 amostras) apresenta teores de sulfato acima do limite (250 mg L⁻¹) legislado pela Portaria MS 2914/11, referente aos padrões de potabilidade da água.
- A maioria dos 2.792 poços se localiza no domínio cristalino (50,14%) e, este é também o domínio que apresenta o maior percentual de poços com teores de sulfato acima do limite legislado (15%). Enquanto que o domínio sedimentar é o que menos contribui com poços com teores elevados de sulfato (somente 1%).
- A concentração média de sulfato para as 2.792 amostras foi de 95,14 mg L⁻¹, estando dentro do limite legislado, de 250 mg L⁻¹, variando entre o LDM e 3026 mg L⁻¹, com mediana dos valores de concentração de 20,60 mg L⁻¹.
- Considerando somente as 289 amostras, que possuem valores de concentração superiores ao limite de 250 mg L⁻¹, a concentração média foi de 569,31 mg L⁻¹, com mediana dos valores de concentração de 429 mg L⁻¹.
- A matriz de correlação de Pearson, para o total das 2.792 amostras, mostrou significativa correlação entre o sulfato e: cálcio, dureza, resíduo, condutividade, magnésio, cloreto, sódio, fluoreto, alcalinidade total e potássio, nessa ordem.
- A matriz de correlação de Spearman, para o total das 2.792 amostras, evidenciou correlação entre o sulfato e: resíduo, condutividade, dureza, magnésio, cálcio, sódio, cloreto, alcalinidade total, fluoreto e potássio, com coeficientes de correlação mais significativos, em comparação aos coeficientes de correlação de Pearson. Além desses parâmetros, a matriz de Spearman também indicou uma significativa correlação entre sulfato e: nitrato, sílica e nitrito.

- A análise das características hidroquímicas das 2.792 amostras de água subterrânea, estudadas por meio dos diagramas de Piper, indicou um predomínio de águas cloretadas mistas, cloretadas cálcicas, bicarbonatadas cálcica e bicarbonatadas sódica.
- Os resultados das concentrações das espécies químicas do sulfato, com a aplicação do método Tableau (software MINEQL +), das 289 amostras de água subterrânea enriquecidas em sulfato, indicaram concentrações maiores para $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ e $\text{MgSO}_4(\text{aq})$, seguido de concentrações menores para NaSO_4^- e concentrações bem baixas de KSO_4^- , como esperado através dos resultados obtidos nas matrizes de correlação de Pearson e Spearman.
- As concentrações das espécies químicas não variaram muito, em todos os domínios hidrogeológicos, independentemente do tipo de geologia encontrado em cada domínio e também independente dos índices pluviométricos.
- Observou-se que a pluviosidade não foi tão influente na concentração e no tipo de espécie química do sulfato encontrado em cada amostra, corroborando com a revisão bibliográfica, já que as águas de precipitação não são fonte de Ca^{2+} e Mg^{2+} , e sim que estes são provenientes do intemperismo causado pelo contato água/rocha. Portanto, visto que as concentrações mais altas encontradas foram para as espécies $\text{CaSO}_4(\text{aq})$ e $\text{MgSO}_4(\text{aq})$, verifica-se que a geologia tem uma influência maior sobre a composição química dessas águas do que a pluviosidade.
- Como foram encontradas concentrações mais altas de $\text{MgSO}_4(\text{aq})$ nas águas, cuja especiação do sulfato foi estudada, e como os sulfatos possuem efeito laxativo sobre os seres humanos, sendo que o sulfato de magnésio possui mais efeito do que o sulfato de sódio, por exemplo, fica o alerta aos consumidores, devido ao efeito laxativo que essas águas podem ter. Além disso, essas águas enriquecidas em sulfato analisadas devem ter tendência a serem amargas, visto que os sulfatos podem alterar o sabor das águas: salgado (Na_2SO_4) e amargo (CaSO_4 e MgSO_4).

8. REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. M. Fatores influentes no Potencial e Processos de Salinização dos Aquíferos Fraturados Cristalinos do Alto da Bacia do Rio Vaza-Barris, Região de Uauá, Bahia, Brasil. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências/UFBA, 2010.

ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SILVA, E. F. F.; BASTOS, E. A.; MELO, F. B.; LEAL, C. M.. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semi-árido piauiense. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 4, p. 873 – 880, Campina Grande, PB, 2006.

ATENCIO, D. Sulfatos secundários: relação com rochas preexistentes e síntese. 210 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986.

BARBETTA, Pedro Alberto. Estatística Aplicada às Ciências Sociais. 5ª edição revisada. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BERTRAND, G. et al. Groundwater contamination in coastal urban areas: Anthropogenic pressure and natural attenuation processes. Example of Recife (PE State, NE Brazil). Journal of Contaminant Hydrology, 192, p. 165–180, 2016.

BÖLKE, John-Karl. Groundwater recharge and agricultural contamination. Hydrogeology Journal, 10, p. 153–179, 2002.

BOMFIM, L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16, 2010, Anais... São Paulo, Brasil - eISSN 2179- 9784. 2010.

BRASIL, Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

CARMO, J. C. C. Ferro na Água Subterrânea do Estado da Bahia: uma avaliação preliminar dos fatores influentes na concentração. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica/UFBA, 2016.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. Geografia, Londrina, v. 8, n. 1, p. 91-97, 1999.

CERB - Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento do Estado da Bahia. Disponível em: <http://www.cerb.ba.gov.br/atividades/perfura%C3%A7%C3%A3o-de-po%C3%A7os>. Acesso em: janeiro de 2017.

CPRM/Ministério de Minas e Energia -Serviço Geológico do Brasil. 1998. Noções básicas sobre poços tubulares. Brasília, 21p.

CPRM/Ministério de Minas e Energia -Serviço Geológico do Brasil. 2005. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea - Diagnóstico do Município de Tucano. Salvador, 35p.

CPRM/SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

DELGADO, C. D.; ALBERICH, M. V. E.; LÓPEZ-VERA, F. Manual sobre recursos hídricos: Conceptos básicos y estudios de casos en iberoamérica. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2ª. ed. São Carlos: RIMA, 2005. 2 v.

FEITOSA, F. A. C., FILHO, J. M., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A.. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.

Fernandes, F. R. D.; Di Souza, L.. Quantificação dos teores de sulfato e ferro nas águas subterrâneas do oeste do Rio Grande do Norte. In: I Encontro Regional de Química: Ciência, Tecnologia e Sociedade. Mossoró RN; 2011.

FISHER, R. S.; MULLICAN, W. F.. Hydrochemical Evolution of Sodium-Sulfate and Sodium-Chloride Groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. Hydrogeology Journal, 5, nº 2, 1997.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A., Groundwater. Prentice – Hall inc., New Jersey, 604 p, 1979

FRITZSONS, E.; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E. et al. As alterações da qualidade da água do rio Capivari com o deflúvio: um instrumento de diagnóstico de qualidade ambiental. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 8, n. 4, p. 239-248, out/dez 2003.

GUERRA, A. M.; NEGRÃO F. I. Domínios hidrogeológicos do Estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9, 1996. Anais... Salvador: ABAS, 1996.

HORST, Axel et. al.. The origin of salinity and sulphate contamination of groundwater in the Colima State, Mexico, constrained by stable isotopes. *Environ Earth Sci*, 64, p. 1931–1941, 2011.

HUDAK, Paul F.; SANMANEE, Sirichai. Spatial Patterns of Nitrate, Chloride, Sulfate, and Fluoride Concentrations in the Woodbine Aquifer of North-Central Texas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 82, p. 311–320, 2003.

HUSSAIN, I.; MUBARAK, N.; SHABBIR, J.; HUSSAIN, T.; FAISAL, M.. Spatial Interpolation of Sulfate Concentration in Groundwater Including Covariates Using Bayesian Hierarchical Models. *Water Qual Expo Health*, v. 7, n. 3, p. 339-345, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2008. Pesquisa Nacional do Saneamento Básico. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: novembro de 2016.

INTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP) [Internet]. Treatment of sulphate in mine effluents. International network for acid prevention. 129 p. 2003. Disponível em: <http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Treatment_of_Sulphate_in_Mine_Effluents_-_Lorax_Report.pdf>. Acesso em: out 2016.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. 2008. Disponível em: <www.iupac.org>. Acesso em: out. 2016.

KAOWN, D.; KOH, D. C.; MAYER, B.; LEE, K. K.. Identification of nitrate and sulfate sources in groundwater using dual stable isotope approaches for an agricultural area with different land use (Chuncheon, mid-eastern Korea). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 132, n. 3, p. 223-231, 2009.

KOVDA, D. A.. Irrigation, drainage and salinity: An international sourcebook. Paris: FAO/ UNESCO. p.177- 205, 1973.

LIRA, S. A. Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. Dissertação de Mestrado, Departamento de Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.209 p.

LIU, X.; SIMUNEK, J.; LI, L.; HE, J.. Identification of sulfate sources in groundwater using isotope analysis and modeling of flood irrigation with waters of different quality in the Jinghuiqu district of China. *Environmental Earth Sciences*, Berlin, v. 69, n. 5, p. 1589-1600, 2013.

MESTRINHO, S. S. P.. *Geoquímica e Contaminação de Águas Subterrâneas*. Natal. Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte, Brasil, 2001.

MESTRINHO, S. S. P.; LUZ, J. A. G. da.; PORCIÚNCULA, D. C. L. da. Análise da vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas na Bacia do Rio Itapicuru, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, 2006, Anais... São Paulo, Brasil - eISSN 2179-9784. 2006.

MIRLEAN, N; MACHADO, M. I.; OSINALDI, G. M.; DEMOLINER, A.; BAISCH, P. O impacto industrial na composição química das águas subterrâneas com enfoque de consumo humano (Rio Grande, RS). *Química Nova*, v. 28, n. 5, p.788-791, 2005.

MMA-MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; SRH-SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. PNRH-Plano Nacional de Recursos Hídricos: síntese executiva. Brasília, ISBN 85-7738-013-0, 2006. 135p.

MOREL, F. M. M., HERING, J. G.. *Principles and Applications of Aquatic Chemistry*, John Wiley & Sons, New York, 1993;

MUBARAK, N.; HUSSAIN, I.; FAISAL, M.; HUSSAIN, T.; SHAD, M. Y.; ABDEL-SALAM, N. M.; SHABBIR, J.. Spatial Distribution of Sulfate Concentration in Groundwater of South-Punjab, Pakistan. *Water Qual Expo Health*, v. 7, n. 3, p. 503-513, 2015.

NEGRÃO, F. I. Determinação do Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS, com base nos dados de Poços Tubulares do Estado da Bahia. Relatório Técnico – Renovação Bolsa Pesquisa, Termo Nº: 1344/2005, FAPESB, Novembro, 2007.

NEGRÃO, F. I. Hidrogeologia do Estado da Bahia: qualidade, potencialidade, disponibilidade, vulnerabilidade e grau de poluição. 194 f. Tese (Doutorado) - Instituto Universitario de Xeoloxía Isidro Parga Pondal, Espanha/Conv. UFBA, 2008.

NEGRÃO, F. I., et al. Hidrogeologia como um dos Critérios de Desertificação. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luiz, MA. 2010.

NIENCHESKI, L. F.; MILANI, M. R.; MILANI, I. B. Metais Traço: Água. Cap.7 Poluição Marinha; Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 2008.

OLIVEIRA, I. B. et. al.. Mapeamento dos Aquíferos do Estado da Bahia Utilizando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS. Águas Subterrâneas, v.21, n.1, p.123-137, 2007.

PAULI, Aline Roberta de. Avaliação da Qualidade da Água Subterrânea Utilizada para Consumo Humano na Região Rural do Município de Toledo-PR. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo-PR, 2014.

PEREL'MAN, A.I. (1963) The aquatic transport and biologic absorption of elements in the soil. In: SCHOELLER, M. (ed.) Recherches sur l'aquisition de la composition chimique des eau souterraines. Bordeaux, p. 179-187.

PINTO, Bernardo Vieira. Características químicas e físico-químicas de águas subterrâneas do Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Química. Rio de Janeiro, 2006.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. Qualidade das águas e poluição: aspectos físicoquímicos. São Paulo: ABES, 2005.

RIBEIRO, D. D. M.; ROCHA, W. J. S.F.; GARCIA, A. J. V. Definição de áreas potenciais para a ocorrência de água subterrânea na sub-bacia do rio siriri-sergipe com o auxílio do ahp (método analítico hierárquico). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16, 2010, Anais... São Paulo, Brasil - eISSN 2179-9784, 2010.

RIBEIRO, P. H. B. Espacialização da vazão produzida por poços tubulares em diferentes formações hidrogeológicas no nordeste baiano. 2013. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Juazeiro-BA.

SANTOS, Jorge. Sistema de Referência de Coordenadas (SRC). Disponível em: <http://www.processamentodigital.com.br/wp->

[contente/uploads/2014/10/20141011_QGIS24_Sistema_de_Referencia_de_Coordenadas.pdf](#).> Acesso em: out de 2016.

SILVA JÚNIOR, L.G.A.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.de. Composição química de águas do cristalino do Nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, n.1, p.11-17, 1999.

SZIKSZAY, Maria. Geoquímica das Águas. Boletim IG- USP. Série Didática ,5. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1993.

VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. v. 1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005. 452p.

XIAOPING, ZHOU et al. Major Ion Geochemistry of Groundwaters from Southern Nevada and Eastern California, USA. Chinese Journal of Geochemistry, 19, nº 1, 2000.

ZIMBRES, E. Guia avançado sobre água subterrânea. Disponível em: <http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/aguasubterranea.htm>. Acesso em: out de 2016.

9. ANEXO

ANEXO I

As análises físico-químicas e químicas, das amostras de água dos poços constantes no Banco de Dados Hidrogeológicos da CERB, foram realizadas no Laboratório do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica (LABDEA-UFBA) e no Laboratório de Química do SENAI-CETIND.

Os métodos utilizados para as análises, como também, os limites de detecção são fundamentados com base na metodologia da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater e nas normas publicadas pela ISO (International Standardization Organization), conforme a tabela a seguir.

Tabela – Métodos e Limites de Detecção praticados pelo LABDEA-UFBA e SENAI-CETIND

Ensaio	Unidade	LMP _{2914/11}	SENAI-CETIND		LABDEA	
			LDM	Método	LDM	Método
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	-	1,1	EN 001 QGI (SMEWW 2310 A/B)	3,0	SM 2310B 21ªEd
Alcal. Bicarbonato	mg/L CaCO ₃	-	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Alcal. Carbonato	mg/L CaCO ₃	-	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Alcal. Hidróxido	mg/L CaCO ₃	-	2,5	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)	3,0	SM 2320B 21ªEd
Cálcio	mg/L CaCO ₃	-	0,2	EN 111 ESP (ASTM D 511- 03B)	3,0	SM 3500-Ca B 21ªEd
Cloretos	mg/L Cl	250	0,010	EN 138 QGI (EPA 300.1)	3,0	SM 4500-Cl B 21ªed
C. Elétrica	µS/cm	-	0,1	EN 030 QGI (SMEWW 2510 A/B)	-	SM 2510B 21ªEd
Cor Aparente	mg/L Pt-Co	15	5	M QGI 011 (SMEWW 2120 A/B)	5,0	SM 2120B 21ªEd
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	500	2,0	M QGI 097 (SMEWW 2340 B)	3,0	SM 2340C 21ªEd
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	0,03	EN 102 ESP (ASTM D 1068- 03)	0,10	SM 3500-Fe B 21ªEd
Fluoretos	mg/L F	1,5	0,001	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,02	SM 4500-F D 21ªEd
Magnésio	mg/L Mg	-	0,3	EN 112 ESP (ASTM D 511- 03)	-	SM 3500- Mg B 21ªEd
Nitratos	mg/L N-NO ₃	10	0,0004	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,01	SM 4500- NO3 E 21ªEd
Nitritos	mg/L N-NO ₂	1,0	0,002	EN 138 QGI (EPA 300.1)	0,005	SM 4500- NO2 B 21ªEd
pH	-	6,0 a 9,5	-	EN 029 QGI(SMEWW 4500 H+ B)	-	SM 4500-H B 21ªEd
Sílica reativa	mg/L SiO ₂	-	0,1	M QGI 035 (SMEWW 4500 Si)	1,0	SM 4500C SiO2 21ªEd
Sólidos Totais	mg/L	200	0,3	EN 113 ESP(ASTM D 4191-03)	10	SM 2540B 21ªEd
Sulfatos	mg/L SO ₄	250	0,002	EN 138 QGI (EPA 300.1)	1,5	SM 4500- SO4 E 14ªEd
Turbidez	NTU	5	0,64	EN 021 QGI (SMEWW 2130 B)	-	SM 2130B 21ªEd

Fonte: Carmo, 2016.

10. APÊNDICE

APÊNDICE A

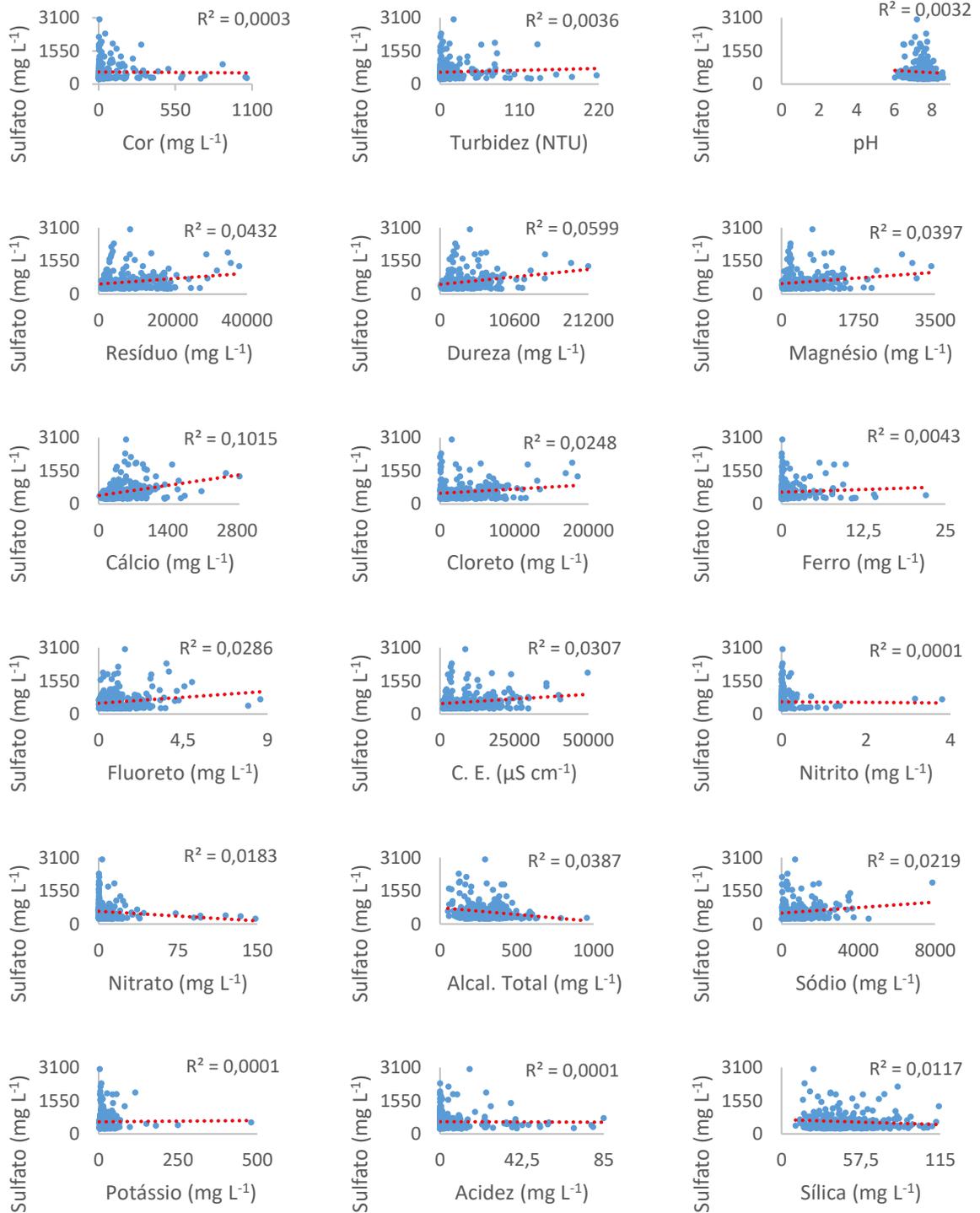
Tabela – Estatística descritiva para as 289 amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹

Parâmetro	Média	Erro Padrão	Mediana	Moda	Desvio Padrão	Curtose	Assimetria	Mínimo	Máximo
Resíduo Total	7937,62	383,54	6280,00	6280,00	6520,11	3,59	1,62	622,00	37888,00
Dureza	3429,16	172,76	2610,00	1360,00	2936,90	7,92	2,24	83,90	21187,20
Cálcio	507,15	21,93	423,60	428,00	372,86	9,24	2,36	14,80	2845,88
Sódio	914,54	53,94	667,10	1000,00	917,02	11,89	2,48	10,50	7860,00
Sílica	48,58	1,24	45,10	38,80	21,10	0,20	0,69	10,20	114,00
pH	7,43	0,03	7,43	7,26	0,44	0,59	-0,20	6,04	8,61
Cloreto	3280,11	187,13	2440,00	111,00	3181,29	3,82	1,63	7,69	18545,00
Nitrato	7,99	1,06	2,32	0,01	18,00	30,20	5,09	0,00	148,00
Condutividade	9864,28	465,97	8070,00	9340,00	7921,41	3,23	1,52	884,00	49800,00
Cor	62,02	8,67	7,00	5,00	147,36	20,52	4,18	0,00	1060,00
Ferro	1,17	0,15	0,17	0,05	2,63	19,29	3,90	0,00	22,00
Fluoreto	1,08	0,06	0,81	0,45	1,08	13,88	2,95	0,00	8,60
Magnésio	528,46	30,72	362,20	106,00	522,28	6,96	2,15	7,53	3411,50
Nitrito	0,09	0,02	0,01	0,01	0,33	80,53	8,26	0,00	3,80
Sulfato	569,31	23,29	429,00	279,00	395,98	8,88	2,64	251,00	3026,00
Turbidez	13,92	1,74	2,29	0,32	29,62	15,67	3,64	0,11	217,00
Acidez	6,22	0,81	0,00	0,00	13,81	11,34	3,21	0,00	84,90
Potássio	21,42	2,13	14,00	18,00	36,20	96,08	8,56	1,40	480,00
Alcal. Total	300,52	7,18	292,00	256,00	122,00	3,03	0,92	50,50	957,00

Fonte: O autor.

APÊNDICE B

Gráficos de dispersão entre o sulfato e os demais parâmetros da água subterrânea, para as 289 amostras enriquecidas em sulfato



Fonte: O autor.

APÊNDICE C

Os quadros a seguir apresentam as matrizes de correlação de Pearson e Spearman, respectivamente, que exprimem numericamente os valores de correlação entre os parâmetros, para as 289 amostras enriquecidas em sulfato, em todos os domínios hidrogeológicos.

Matriz de correlação linear de Pearson para as 289 amostras de água subterrânea enriquecidas em sulfato

	Resíd	Dureza	Ca ²⁺	Na ⁺	SiO ₂	PH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Cond	Cor	Fe	F ⁻	Mg ²⁺	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Turb.	Acid.	K ⁺	Alcal Total
Resíduo	1,00																		
Dureza	0,93	1,00																	
Ca ²⁺	0,81	0,89	1,00																
Na ⁺	0,80	0,61	0,47	1,00															
SiO ₂	0,12	0,13	0,08	0,12	1,00														
pH	-0,08	-0,06	-0,09	-0,03	0,01	1,00													
Cl ⁻	0,97	0,91	0,78	0,86	0,14	-0,06	1,00												
NO ₃ ⁻	0,06	0,03	0,01	0,13	0,14	0,01	0,07	1,00											
Condutividade	0,92	0,85	0,71	0,86	0,13	-0,05	0,96	0,09	1,00										
Cor	0,12	0,12	0,13	0,03	-0,01	-0,11	0,09	-0,14	0,07	1,00									
Fe	0,28	0,28	0,27	0,14	0,01	-0,25	0,24	-0,15	0,23	0,72	1,00								
F ⁻	-0,04	-0,01	0,01	0,01	0,08	0,09	0,01	0,02	0,02	-0,07	-0,11	1,00							
Mg ²⁺	0,93	0,98	0,79	0,63	0,14	-0,05	0,91	0,04	0,86	0,10	0,26	-0,02	1,00						
NO ₂ ⁻	0,13	0,18	0,12	0,15	0,10	0,09	0,21	0,09	0,26	-0,06	-0,05	0,32	0,20	1,00					
SO ₄ ²⁻	0,21	0,24	0,32	0,15	-0,11	-0,06	0,16	-0,14	0,18	-0,02	0,07	0,17	0,20	-0,01	1,00				
Turbidez	0,21	0,19	0,20	0,15	0,00	-0,26	0,19	-0,15	0,17	0,71	0,93	-0,11	0,17	-0,07	0,06	1,00			
Acidez	0,24	0,22	0,09	0,18	-0,08	-0,30	0,24	-0,08	0,25	-0,10	0,15	0,03	0,27	0,10	-0,01	0,08	1,00		
K ⁺	0,30	0,26	0,18	0,30	0,04	-0,12	0,32	0,00	0,32	0,02	0,10	-0,02	0,28	0,07	0,01	0,11	0,37	1,00	
Alcal Total	0,11	0,06	-0,12	0,18	0,19	-0,07	0,12	0,09	0,15	-0,05	-0,03	0,02	0,14	0,11	-0,20	-0,06	0,08	0,06	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha=0,05$ e $n=289$ é 0,197. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos da água subterrânea.

Fonte: O autor.

Matriz de correlação de Spearman para as 289 amostras de água subterrânea enriquecidas em sulfato

	Resíd.	Dureza	Ca ²⁺	Na ⁺	SiO ₂	PH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Cond	Cor	Fe	F ⁻	Mg ²⁺	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Turb	Acid.	K ⁺	Alcal Total
Resíduo	1,00																		
Dureza	0,95	1,00																	
Ca ²⁺	0,79	0,88	1,00																
Na ⁺	0,87	0,75	0,55	1,00															
SiO ₂	0,21	0,22	0,12	0,19	1,00														
pH	-0,12	-0,13	-0,11	-0,06	0,02	1,00													
Cl ⁻	0,97	0,92	0,74	0,91	0,20	-0,09	1,00												
NO ₃ ⁻	0,13	0,12	0,02	0,15	0,14	0,04	0,15	1,00											
Condutividade	0,98	0,93	0,76	0,91	0,20	-0,10	0,98	0,14	1,00										
Cor	0,16	0,13	0,14	0,11	0,04	-0,06	0,13	-0,37	0,12	1,00									
Fe	0,36	0,34	0,31	0,29	0,12	-0,23	0,36	-0,42	0,37	0,50	1,00								
F ⁻	0,00	-0,04	-0,04	0,07	0,05	0,06	-0,02	-0,04	0,00	0,02	-0,08	1,00							
Mg ²⁺	0,95	0,96	0,75	0,79	0,25	-0,12	0,93	0,17	0,94	0,07	0,31	-0,06	1,00						
NO ₂ ⁻	0,19	0,19	0,11	0,18	0,06	-0,07	0,20	0,32	0,22	-0,03	0,01	0,03	0,24	1,00					
SO ₄ ²⁻	0,18	0,24	0,38	0,09	-0,10	-0,03	0,11	-0,25	0,16	0,04	0,13	0,03	0,16	-0,10	1,00				
Turbidez	0,24	0,21	0,20	0,17	0,07	-0,16	0,22	-0,40	0,22	0,65	0,76	-0,07	0,19	-0,02	0,06	1,00			
Acidez	0,07	0,06	0,01	0,12	-0,04	-0,30	0,10	-0,02	0,10	-0,30	0,07	0,04	0,07	0,05	-0,07	-0,07	1,00		
K ⁺	0,65	0,59	0,45	0,58	0,26	-0,15	0,65	0,05	0,63	0,17	0,34	-0,13	0,61	0,18	0,01	0,23	0,10	1,00	
Alcal Total	0,21	0,17	-0,06	0,29	0,19	-0,09	0,23	0,34	0,24	-0,11	-0,12	0,07	0,27	0,16	-0,14	-0,16	-0,10	0,11	1,00

Nota: O nível de significância para $\alpha=0,05$ e $n=289$ é 0,197. Os valores em vermelho expressam uma correlação significativa entre o sulfato e os parâmetros físico-químicos e químicos da água subterrânea.

Fonte: O autor.

APÊNDICE D

Após a aplicação do método *Tableau*, através do software MINEQL +®, foram obtidas as concentrações das espécies químicas do sulfato, para as 289 amostras de água subterrânea com teores de sulfato acima de 250 mg L⁻¹. A concentração de cada espécie obtida foi trabalhada da seguinte forma:

Ordem de grandeza da concentração	Número correspondente
10 ⁻⁷ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁶ mol L ⁻¹	1
10 ⁻⁶ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁵ mol L ⁻¹	2
10 ⁻⁵ mol L ⁻¹ a 10 ⁻⁴ mol L ⁻¹	3
10 ⁻⁴ mol L ⁻¹ a 10 ⁻³ mol L ⁻¹	4
10 ⁻³ mol L ⁻¹ a 10 ⁻² mol L ⁻¹	5
10 ⁻² mol L ⁻¹ a 10 ⁻¹ mol L ⁻¹	6
10 ⁻¹ mol L ⁻¹ a 10 ⁰ mol L ⁻¹	7

As concentrações das espécies químicas do sulfato serão tratadas pelo número correspondente, a fim de facilitar o entendimento do trabalho.

Os resultados obtidos para as concentrações das espécies químicas do sulfato serão detalhados nos quadros a seguir, para todos os domínios hidrogeológicos.

Domínio das rochas sedimentares

Especiação química do sulfato do domínio sedimentar

Nº da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade (mm)	Domínio Geológico
17168	CACHOEIRA	4	2	4	4	1200	DCGMGLgnp
20656	CAMAMÚ	4	2	4	3	1800	DCT
22102	ARACI	5	3	6	5	600	DSMqcg
17309	IGRAPIUNA	5	1	5	4	1900	DCm

Fonte: O autor.

Domínio das rochas metassedimentares

Especiação química do sulfato do domínio metassedimentar

Nº da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Metassedimentar Oeste							

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
18617	RIACHÃO DAS NEVES	5	1	5	3	900	DSP2mcx
19630	BARRA	5	2	5	3	800	DCDL
21658	CAETITÉ	5	2	4	3	700	DCDL
Metassedimentar Leste Parte 1							
20421	ANAGÉ	5	2	5	4	600	DSVP2gratv
17700	IRAMAIA	5	2	5	3	600	DSVP2gratv
22551	ARACATU	5	1	5	3	800	DCGMGLmgi
22223	BELO CAMPO	4	1	5	3	700	DCGR3salc
22498	ANAGÉ	5	2	4	3	600	DCGMGLgno
21845	VITÓRIA DA CONQUISTA	5	2	5	4	700	DCGMGLgno
21895	VITÓRIA DA CONQUISTA	5	2	5	3	700	DCGMGLmo
23091	ANAGÉ	5	2	5	4	700	DCGMGLmo
Metassedimentar Leste Parte 2							
20107	CANUDOS	5	2	5	4	500	DSVP2vfc
20911	CHORROCHÓ	5	2	5	4	500	DSVP2vfc
22810	CANUDOS	5	2	5	3	500	DSP2mcsaa
18187	JUAZEIRO	5	1	5	3	500	DSP2mcsaa
22851	CHORROCHÓ	5	2	5	4	500	DCGMGLgno
18337	CURAÇÁ	4	2	4	3	500	DSP1csaa
21176	CURAÇÁ	5	2	5	4	500	DSP1csaa
20976	MACURURÉ	5	2	5	4	500	DSVP2gratv
21317	MIRANGABA	4	2	5	3	600	DCGR2salc
Metassedimentar Leste Parte 3							
21775	CORONEL JOÃO SÁ	5	2	5	4	700	DSVP2gratv
18802	PARIPIRANGA	5	1	4	3	600	DSVP2gratv
18805	PARIPIRANGA	5	2	4	3	600	DSVP2gratv
21777	CORONEL JOÃO SÁ	5	2	5	4	600	DCGR1pal
18807	PARIPIRANGA	5	2	5	4	600	DSVP2bu
19155	PARIPIRANGA	5	2	4	3	700	DSP2mcsaa

Fonte: O autor.

Domínio das rochas calcárias

Especiação química do sulfato do domínio calcário

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄	Pluviosidade	Domínio Geológico
Calcário Oeste							
18571	IUIÚ	5	1	4	3	800	DSP2mcsaa
22130	IUIÚ	5	2	4	3	800	DSP2mcsaa
19704	IUIÚ	4	1	4	3	800	DSP1csaa
20286	BREJOLÂNDIA	4	2	4	4	900	DCDL
20996	PAU BRASIL	5	1	4	3	1200	DSP2mcx
22133	IUIÚ	5	2	4	3	800	DSP2mcx
Calcário Irecê Parte 1							
17949	BARRA DO MENDES	5	2	4	3	700	DSP2mcsaa
19432	BARRA DO MENDES	5	2	4	3	700	DSP2mcsaa
22216	BARRA DO MENDES	5	1	5	3	700	DSP2mcsaa
19244	CAFAR-NAUM	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
19410	CAFAR-NAUM	5	2	4	3	600	DSP2mcsaa
22519	CAFAR-NAUM	5	1	4	3	600	DSP2mcsaa
18351	CANARANA	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
18724	CANARANA	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
19802	CANARANA	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
21841	CANARANA	5	2	4	3	600	DSP2mcsaa
23034	CANARANA	5	1	4	3	600	DSP2mcsaa
20682	IBIPEBA	5	1	4	3	700	DSP2mcsaa
22461	IRAQUARA	5	2	5	3	800	DSP2mcsaa
17703	ITAETÊ	5	1	5	4	700	DSP2mcsaa
19215	LAPÃO	5	2	5	4	600	DSP2mcsaa
17705	MULUNGU DO MORRO	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
20374	SOUTO SOARES	5	2	5	3	700	DSP2mcsaa
22077	CAFAR-NAUM	4	1	4	2	600	DSP1csaa
23043	CANARANA	5	1	4	4	600	DSP1csaa
Calcário Irecê Parte 2							
20788	IBIPEBA	4	2	4	3	700	DSP2mcsaa
18433	JOÃO DOURADO	4	2	4	3	500	DSP2mcsaa
22032	JOÃO DOURADO	5	2	5	3	500	DSP2mcsaa
18612	MORRO DO CHAPÉU	5	2	5	3	500	DSP2mcsaa
22418	MORRO DO CHAPÉU	5	2	5	3	500	DSP2mcsaa
20879	OUROLÂNDIA	5	2	5	4	500	DSP2mcsaa
20921	OUROLÂNDIA	5	2	5	3	500	DSP2mcsaa
20928	OUROLÂNDIA	5	2	5	4	500	DSP2mcsaa

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
17444	SÃO GABRIEL	4	2	4	3	600	DSP2mcsaa
18184	SÃO GABRIEL	5	2	4	3	500	DSP2mcsaa
18626	UIBAÍ	5	1	4	3	600	DSP2mcsaa
20248	UMBURA-NAS	4	2	4	3	500	DSP2mcsaa
19892	ITAGUAÇÚ DA BAHIA	5	2	4	3	700	DCDL
19007	JUSSARA	5	1	4	3	600	DCDL
19008	JUSSARA	5	1	4	3	600	DCDL
20240	OUROLÂNDIA	4	2	4	3	500	DCDL
21071	OUROLÂNDIA	5	1	4	3	500	DCDL
18953	UMBURA-NAS	5	2	5	3	500	DCDL
18954	UMBURA-NAS	5	2	5	3	500	DCDL
22199	VÁRZEA NOVA	5	3	5	4	500	DCDL
Calcário Irecê Parte 3							
18237	ADUSTINA	5	1	4	4	700	DSVP2csa
18524	PARIPIRANGA	5	2	5	4	700	DSP2mcsaa
19115	PARIPIRANGA	5	2	5	3	600	DSP2mcsaa
19116	PARIPIRANGA	5	2	5	4	600	DSP2sag

Fonte: O autor.

Domínio das rochas cristalinas

Especiação química do sulfato do domínio cristalino

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
Cristalino Sudeste Parte 1							
21182	ARACATU	5	2	4	3	700	DCGMGLgno
22928	IBIASSUCÊ	5	2	4	3	700	DCGMGLgno
19755	LICÍNIO DE ALMEIDA	5	2	5	3	700	DCGMGLgno
22785	BARRA DA ESTIVA	4	2	5	3	600	DSVP2gratv
18346	BELO CAMPO	5	2	4	3	800	DCDL
20925	BRUMADO	5	2	5	3	700	DCDL
21485	LICÍNIO DE ALMEIDA	4	2	4	3	700	DCDL
19393	TREMEDAL	5	2	4	3	800	DCDL
20640	BELO CAMPO	5	2	5	4	800	DCGR3salc
17596	BRUMADO	4	2	4	3	600	DCGMGLmo
19436	CARAÍBAS	5	2	5	3	700	DCGMGLmo

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
20712	MALHADA DE PEDRAS	5	2	4	3	700	DCGMGLmo
22505	TREMEDAL	5	3	4	4	800	DCGMGLmo
22863	TREMEDAL	4	3	4	3	800	DCGMGLmo
23237	TREMEDAL	5	2	5	4	800	DCGMGLmo
20808	LIVRAMENTO DE NOSSA SENHORA	5	2	5	4	600	DGBss
21137	URANDI	5	2	4	3	700	DSP2sag
Cristalino Sudeste Parte 2							
20098	BURITIRAMA	5	2	5	3	800	DCDL
17433	CASA NOVA	4	2	4	3	500	DCDL
18775	CASA NOVA	5	2	5	4	500	DCDL
21921	CASA NOVA	5	2	5	3	500	DCDL
17692	CAMPO ALEGRE DE LOURDES	5	2	5	3	700	DCAalc
18171	CASA NOVA	5	2	4	3	500	DSP2mcsaa
Cristalino Sul Parte 1							
17673	IRAMAIA	4	2	5	3	600	DCGR2salc
17698	IRAMAIA	5	3	5	4	600	DCGR2salc
22630	MARACÁS	5	2	5	3	600	DCGR2salc
17526	JAGUAQUARA	5	2	5	4	700	DCGMGLgli
20469	JEQUIÉ	4	1	5	3	800	DCGMGLgli
21621	JEQUIÉ	5	2	5	4	800	DCGMGLgli
19113	MANOEL VITORINO	5	2	5	3	700	DCGMGLgli
19603	MANOEL VITORINO	4	1	5	3	700	DCGMGLgli
20489	MANOEL VITORINO	5	1	5	3	700	DCGMGLgli
20490	MANOEL VITORINO	5	2	5	3	600	DCGMGLgli
20585	MANOEL VITORINO	4	1	5	3	800	DCGMGLgli
23102	MANOEL VITORINO	4	2	5	3	600	DCGMGLgli
19289	JEQUIÉ	5	2	5	3	700	DCMUmu
22678	MANOEL VITORINO	5	2	5	4	600	DCMUmu
22633	MARACÁS	5	2	6	4	600	DCMUmu
22677	MANOEL VITORINO	4	2	5	3	600	DCGR3ch
20988	MARACÁS	5	2	5	3	600	DCGR3ch
23039	MARCIONÍLIO SOUZA	5	2	5	4	600	DCGR3ch
21892	SANTA INÊS	5	2	5	3	600	DCGR3ch
20339	MARACÁS	5	2	5	3	600	DSVP2gratv

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
21688	MARCIONÍLIO SOUZA	5	2	4	3	700	DCGMGLmo
21014	TAPEROÁ	5	2	4	3	1600	DCMUbu
Cristalino Sul Parte 2							
20418	ANAGÉ	5	2	5	3	700	DCGMGLmo
23092	ANAGÉ	4	2	5	3	700	DCGR3salc
23225	VITÓRIA DA CONQUISTA	5	2	4	4	800	DCGR3salc
17591	VITÓRIA DA CONQUISTA	5	2	5	4	700	DCGR3salc
23093	ANAGÉ	5	2	5	4	700	DSP2msa
20559	BOA NOVA	4	1	5	3	800	DCGMGLgli
22602	BOA NOVA	5	1	5	3	800	DCGMGLgli
19710	BOM JESUS DA SERRA	5	2	5	3	600	DCGR3ch
22753	BOM JESUS DA SERRA	5	2	5	3	800	DCGR3ch
19638	ENCRUZILHADA	5	2	4	3	800	DCGMGLgnp
19593	ITORORÓ	5	3	5	4	900	DCGMGLgno
20345	MIRANTE	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
21508	PLANALTO	5	2	5	3	800	DCGMGLgno
19382	VITÓRIA DA CONQUISTA	5	2	4	3	700	DCGMGLgno
19218	MACARANÍ	5	2	5	3	900	DSVP2vfc
Cristalino Norte Parte 1							
20092	ABARÉ	5	2	5	3	500	DCGMGLgnp
20751	ABARÉ	5	2	5	5	500	DCGMGLgnp
21552	ABARÉ	4	2	5	3	500	DCGMGLgnp
22888	ABARÉ	4	2	5	4	500	DCGMGLgnp
22889	ABARÉ	5	2	4	5	500	DCGMGLgnp
20056	CANUDOS	5	1	5	3	600	DCGMGLgno
20108	CANUDOS	5	1	5	4	600	DCGMGLgno
19956	MONTE SANTO	4	2	5	4	600	DCGMGLgno
21580	MONTE SANTO	5	2	1	4	600	DCGMGLgno
22569	MONTE SANTO	4	2	5	4	600	DCGMGLgno
22594	MONTE SANTO	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
22596	MONTE SANTO	4	1	5	3	500	DCGMGLgno
23158	MONTE SANTO	4	1	5	3	600	DCGMGLgno
16777	UAUÁ	4	2	5	4	600	DCGMGLgno
16781	UAUÁ	5	2	5	4	500	DCGMGLgno
16798	UAUÁ	5	2	5	3	500	DCGMGLgno

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
17891	UAUÁ	5	1	5	4	500	DCGMGLgno
19123	UAUÁ	5	2	5	4	500	DCGMGLgno
19242	UAUÁ	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
22811	CANUDOS	5	2	6	4	600	DCMUmu
18249	CURAÇÁ	5	1	5	4	500	DCGMGLmgi
18172	EUCLIDES DA CUNHA	5	2	5	4	600	DGBvai
16774	UAUÁ	5	2	5	4	600	DGBvai
16775	UAUÁ	5	2	5	4	600	DGBvai
23304	UAUÁ	5	2	5	4	600	DGBvai
20974	MACURURÉ	5	2	5	4	500	DSMqcg
21189	SANTA BRÍGIDA	5	2	5	4	700	DCGR1alc
Cristalino Norte Parte 2							
18050	ANDORINHA	5	2	5	4	600	DCDL
22482	CAÉM	5	2	5	4	800	DCDL
22377	CALDEIRÃO GRANDE	5	1	5	3	600	DCDL
22567	FILADÉLFIA	5	2	5	3	700	DCDL
17748	JACOBINA	5	1	5	4	800	DCDL
21899	JACOBINA	5	3	4	4	700	DCDL
22689	QUEIMADAS	4	2	5	4	600	DCDL
22984	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCDL
22674	ANDORINHA	4	1	5	3	600	DCGMGLgnp
22568	FILADÉLFIA	5	2	5	4	700	DCGMGLgnp
23399	ITIÚBA	5	2	5	3	600	DCGMGLgnp
18075	JAGUARARÍ	4	2	5	2	700	DCGMGLgnp
19967	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCGMGLgnp
18012	ITIÚBA	5	2	5	4	600	DCAsbalc
18015	ITIÚBA	5	2	5	4	600	DCAsbalc
19107	ITIÚBA	5	2	5	4	600	DCAsbalc
23283	ITIÚBA	5	3	5	4	600	DCAsbalc
21513	ITIÚBA	5	2	5	3	600	DCGR3ch
22655	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCGR3ch
22656	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCGR3ch
22657	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCGR3ch
22764	QUEIMADAS	5	2	5	4	600	DCGR3ch
23008	JACOBINA	4	2	5	3	800	DCGMGLmo
17434	JAGUARARÍ	5	2	5	4	600	DCGMGLmo
17869	JAGUARARÍ	4	1	5	3	600	DCGMGLmo
18079	JAGUARARÍ	5	2	5	4	600	DCGMGLmo
19075	JAGUARARÍ	5	2	5	4	600	DCGMGLmo
17871	JUAZEIRO	5	2	5	3	500	DCGMGLmo

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
19081	PINDOBAÇU	5	2	5	3	700	DCGMGLmo
17872	JUAZEIRO	5	3	5	4	500	DCDC
Cristalino Norte Parte 3							
18593	ARACI	5	2	5	4	600	DGBvai
22477	ARACI	5	2	5	4	600	DGBvai
19928	CANSAN-ÇÃO	5	2	5	4	600	DGBvai
23162	SANTA LUZ	5	3	5	4	600	DGBvai
22528	ARACI	5	2	5	4	600	DCGR2salc
22924	SANTA BÁRBARA	4	1	5	4	700	DCGR2salc
19932	CANSAN-ÇÃO	5	2	5	4	600	DCMUmu
21867	CAPELA DO ALTO ALEGRE	5	1	5	4	600	DCMUmu
20935	CANSAN-ÇÃO	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
20127	SANTA LUZ	5	2	5	3	600	DCGMGLgno
21136	SANTA LUZ	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
19975	SÃO GONÇALO DOS CAMPOS	5	3	5	4	1200	DCGMGLgno
23497	SERRINHA	4	2	5	4	700	DCGMGLgno
21647	FEIRA DE SANTANA	5	2	5	4	700	DCGR3ch
21649	FEIRA DE SANTANA	5	2	5	4	700	DCGR3ch
21806	RIACHÃO DO JACUIPE	5	1	5	4	600	DCGR3ch
22494	RIACHÃO DO JACUIPE	5	1	5	4	600	DCGR3ch
22495	RIACHÃO DO JACUIPE	5	2	5	3	600	DCGR3ch
23295	SANTA BÁRBARA	4	2	5	4	700	DCGR3ch
20616	SANTA LUZ	4	2	5	4	600	DCGR3ch
21865	CAPELA DO ALTO ALEGRE	5	2	5	4	600	DCGR3ch
18812	SANTA LUZ	4	1	5	3	600	DCGMGLgnp
19021	SANTA LUZ	4	2	5	4	600	DCGMGLgnp
19120	SANTA LUZ	5	2	5	4	600	DCGMGLgnp
19302	SANTA LUZ	5	2	5	4	600	DCGR3salc
21518	SANTA LUZ	5	2	6	4	600	DCGR3salc
23163	SANTA LUZ	5	3	5	4	600	DCGR3salc
Cristalino Norte Parte 4							
18595	BAIXA GRANDE	5	2	5	3	700	DCGR3ch
18010	IPIRÁ	5	2	5	4	600	DCGR3ch

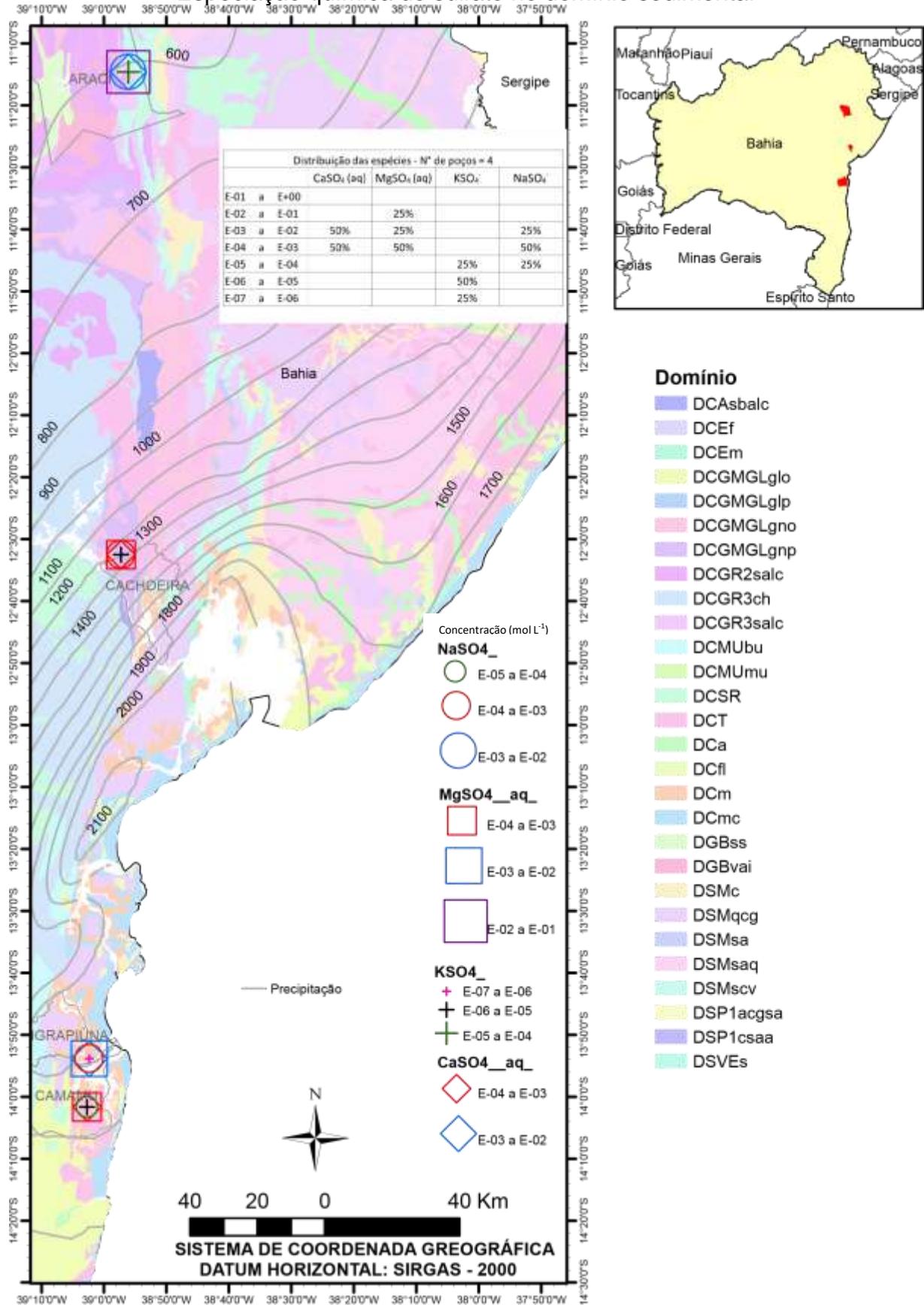
N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluviosidade	Domínio Geológico
18011	IPIRÁ	4	2	5	4	600	DCGR3ch
19202	IPIRÁ	5	2	5	4	600	DCGR3ch
19203	IPIRÁ	5	2	5	4	600	DCGR3ch
21504	IPIRÁ	5	2	4	3	600	DCGR3ch
21723	IPIRÁ	5	2	5	3	600	DCGR3ch
17385	SERRA PRETA	5	2	5	4	600	DCGR3ch
17634	SERRA PRETA	4	1	5	4	700	DCGR3ch
18117	SERRA PRETA	4	1	5	4	600	DCGR3ch
18118	SERRA PRETA	4	2	5	4	600	DCGR3ch
20243	SERRA PRETA	5	2	5	4	600	DCGR3ch
22179	SERRA PRETA	5	2	5	4	600	DCGR3ch
21520	BAIXA GRANDE	4	2	5	3	800	DCGMGLgnp
21521	BAIXA GRANDE	5	2	5	4	700	DCMUmu
21722	BAIXA GRANDE	5	2	5	3	800	DCGR2salc
23068	BAIXA GRANDE	4	2	5	4	800	DCGR2salc
23105	BAIXA GRANDE	4	2	5	4	800	DCGR2salc
20073	IPIRÁ	5	2	5	4	600	DCGR2salc
23145	BAIXA GRANDE	5	1	5	4	800	DCGMGLmo
18009	IPIRÁ	5	2	5	4	600	DCGMGLgno
17630	RAFAEL JAMBEIRO	4	2	5	4	700	DCGMGLgno
Cristalino Norte Parte 5							
22896	ITABERABA	5	2	5	4	700	DCGR3ch
18608	MACAJUBA	5	2	5	4	800	DCGMGLmo
18610	MACAJUBA	4	1	5	3	800	DCGMGLmo
20334	MAIRÍ	5	2	5	3	700	DCGMGLmo
22019	MAIRÍ	5	2	5	4	700	DCGMGLmo
19175	MUNDO NOVO	5	2	5	3	800	DCGMGLmo
23054	PIRITIBA	5	2	5	4	700	DCGMGLmo
20828	RUY BARBOSA	5	2	5	3	800	DCGMGLmo
22926	TAPIRAMUTÁ	5	2	5	4	700	DCGMGLmo
23134	TAPIRAMUTÁ	5	2	4	4	600	DCGMGLmo
18611	MACAJUBA	5	2	5	4	700	DCGMGLgno
22910	MACAJUBA	4	2	5	4	700	DCGMGLgno

N° da amostra	Município	CaSO ₄ (aq)	KSO ₄ ⁻	MgSO ₄ (aq)	NaSO ₄ ⁻	Pluvio- sidade	Domínio Geológico
22533	RUY BARBOSA	5	2	5	4	700	DCGMGLgno
22902	MACAJUBA	5	2	5	3	800	DCGMGLgnp
20486	MAIRÍ	5	2	5	3	800	DCGMGLgnp
17711	RUY BARBOSA	5	2	5	4	800	DCGMGLgnp
19076	MAIRÍ	4	2	5	3	700	DCGR3salc
20335	MAIRÍ	5	2	5	3	700	DCGR3salc
23069	PIRITIBA	5	2	5	3	800	DCGR2salc
Cristalino Norte Parte 6							
20435	BOA VISTA DO TUPIIM	5	2	5	4	700	DSP2mqmtc
22531	BOA VISTA DO TUPIIM	5	2	5	3	600	DCGR3ch
18843	GAVIÃO	5	2	5	4	600	DCGR3ch
22800	SANTA TEREZINHA	4	2	5	3	700	DCGR3ch
22802	SANTA TEREZINHA	4	2	5	4	700	DCGR3ch
18859	TANQUINHO	4	2	5	4	700	DCGR3ch
19023	TANQUINHO	5	1	5	3	700	DCGR3ch
20381	VÁRZEA DA ROÇA	5	1	5	3	600	DCGR3ch
17604	VARZEDO	5	2	5	4	1000	DCGR3ch
21624	CAPIM GROSSO	5	2	5	4	600	DCGMGLgnp
21864	CAPIM GROSSO	5	2	5	4	600	DCGMGLgnp
22371	CAPIM GROSSO	5	2	5	4	600	DCGMGLgnp
19197	GAVIÃO	4	2	5	4	600	DCGMGLgnp
19198	GAVIÃO	4	2	5	4	600	DCGMGLgnp
22373	CAPIM GROSSO	5	2	5	3	600	DCGR2salc
18844	GAVIÃO	5	1	5	4	600	DCGR2salc
20449	GAVIÃO	4	2	5	3	600	DCGR2salc
20024	CASTRO ALVES	5	2	5	4	1000	DCSR
18415	CORONEL JOÃO SÁ	4	2	5	4	600	DCGR1pal
19105	GAVIÃO	5	2	5	4	600	DCGR1pal
22480	MIGUEL CALMON	5	2	5	3	700	DCMUmu
22339	MORRO DO CHAPÉU	5	2	5	4	600	DSP1saagr
22690	QUIXABEIRA	5	2	5	4	600	DCDL
22757	VÁRZEA DO POÇO	5	2	5	3	700	DCGR3salc
23247	SERROLÂN- DIA	5	2	4	4	700	DCDL

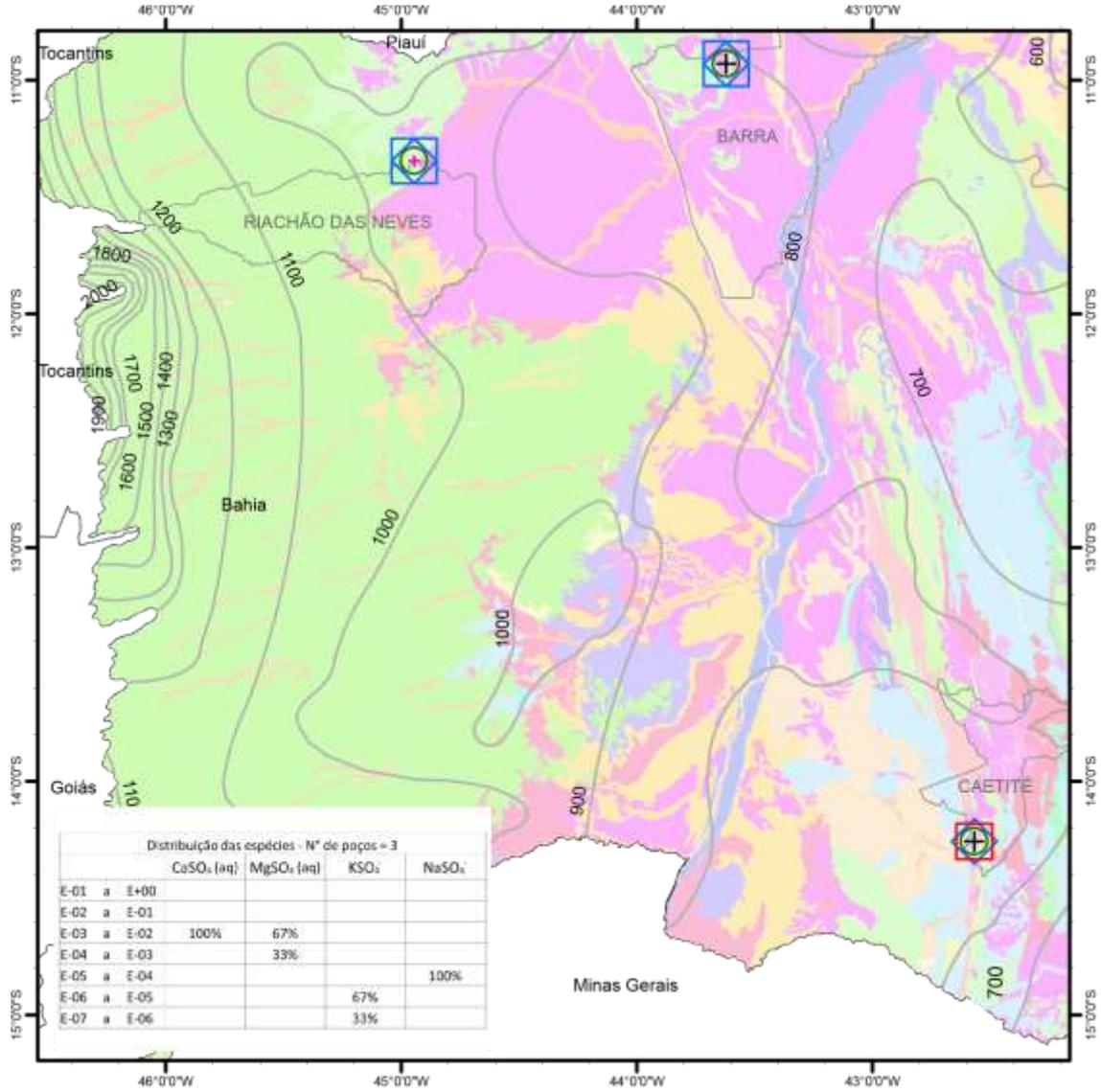
Fonte: O autor.

APÊNDICE E

Especiação química do sulfato no domínio sedimentar



Especiação química do sulfato no domínio metassedimentar oeste



Concentração (mol L⁻¹)

NaSO₄_
 ○ E-05 a E-04

MgSO₄_aq_
 □ E-04 a E-03
 □ E-03 a E-02

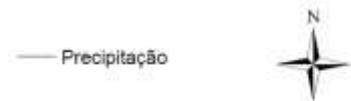
KSO₄_
 + E-07 a E-06
 + E-06 a E-05

CaSO₄_aq_
 ◊ E-03 a E-02

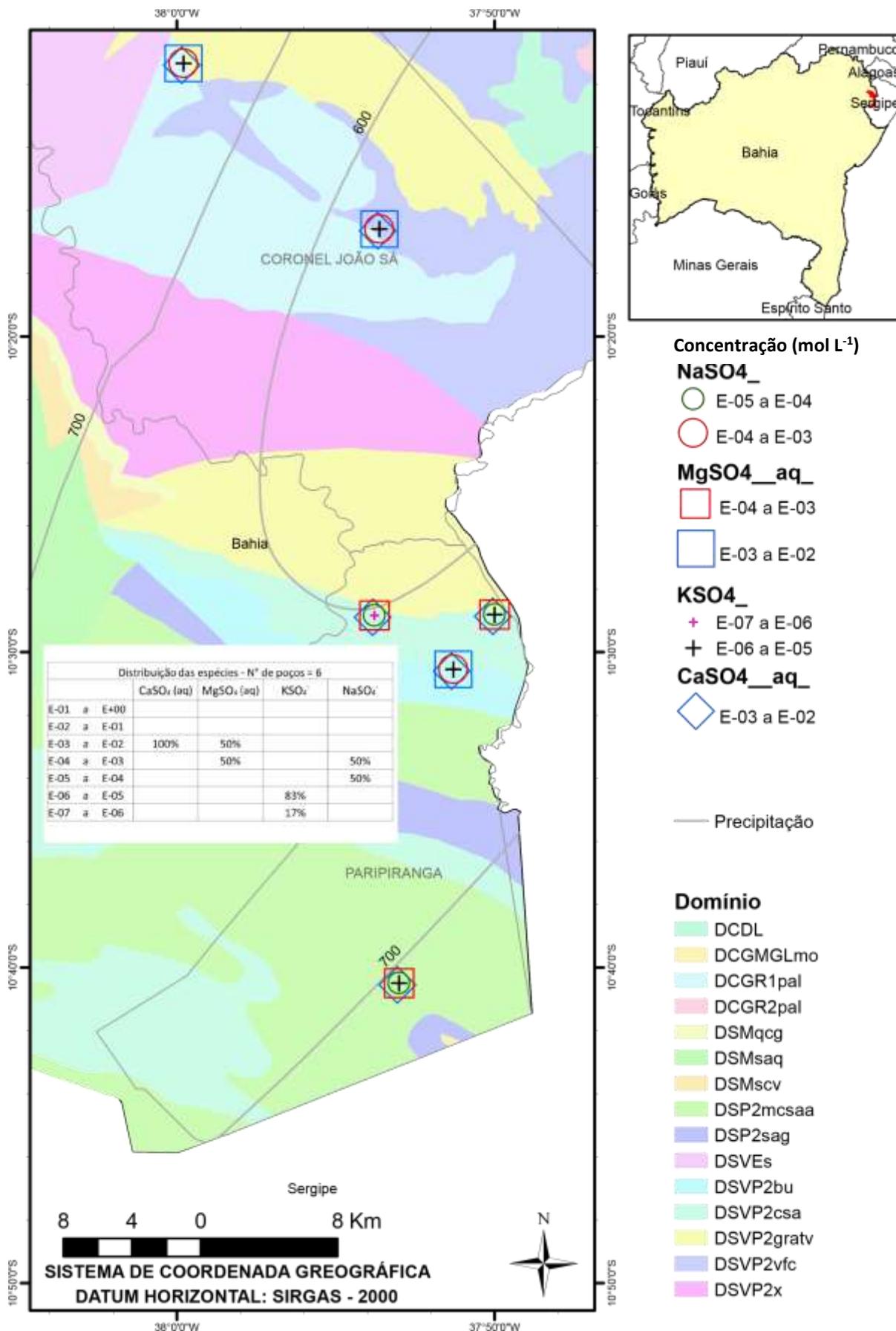
Domínio

- DCDC
- DCDL
- DCEf
- DCGMGLgno
- DCGMGLmgi
- DCGMGLmo
- DCGMGLmp
- DCGR1pal
- DCGR2alc
- DCGR2salc
- DCMUbu
- DCMa
- DCa
- DCta
- DGBko
- DGBss
- DGBvs
- DSP1acgsa
- DSP1csaa
- DSP1saagr
- DSP2mcsaa
- DSP2mcx
- DSP2mqmtc
- DSP2mqsafmg
- DSP2msa
- DSP2sag
- DSVP1vaa
- DSVP2af
- DSVP2va
- DSVP2vfc

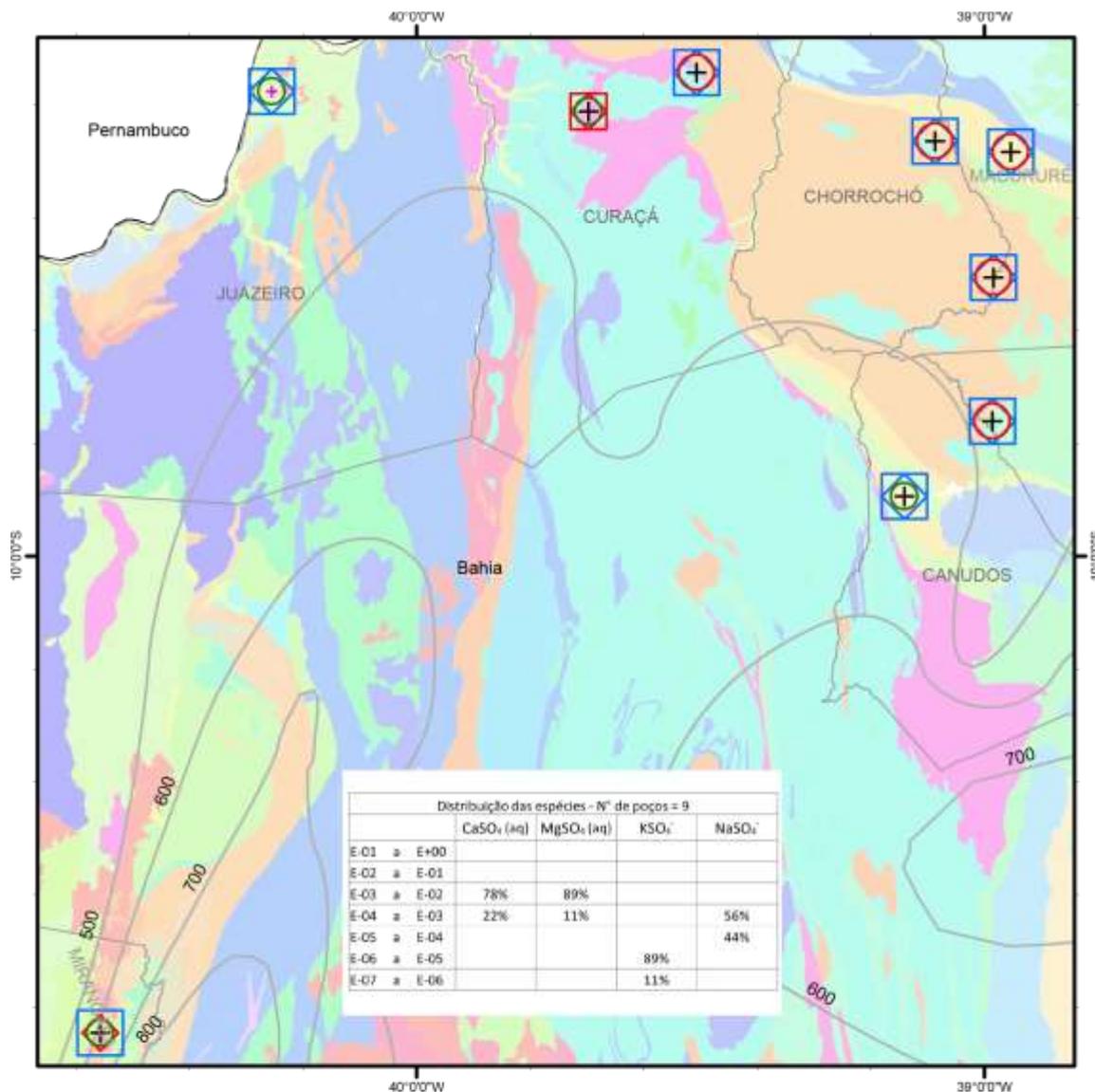
80 40 0 80 Km
 DATUM HORIZONTAL: SIRGAS - 2000
 SISTEMA DE COORDENADA GEOGRÁFICA



Especiação química do sulfato no domínio metassedimentar leste – parte 1



Especiação química do sulfato no domínio metassedimentar leste – parte 2



25 12.5 0 25 Km

SISTEMA-DE-COORDENADA-GREGOGRÁFICA
DATUM HORIZONTAL: SIRGAS - 2000

Concentração (mol L⁻¹)

- NaSO₄_**
- E-05 a E-04
- E-04 a E-03
- MgSO₄_aq_**
- E-04 a E-03
- E-03 a E-02
- KSO₄_**
- + E-07 a E-06
- + E-06 a E-05
- CaSO₄_aq_**
- ◇ E-04 a E-03
- ◇ E-03 a E-02

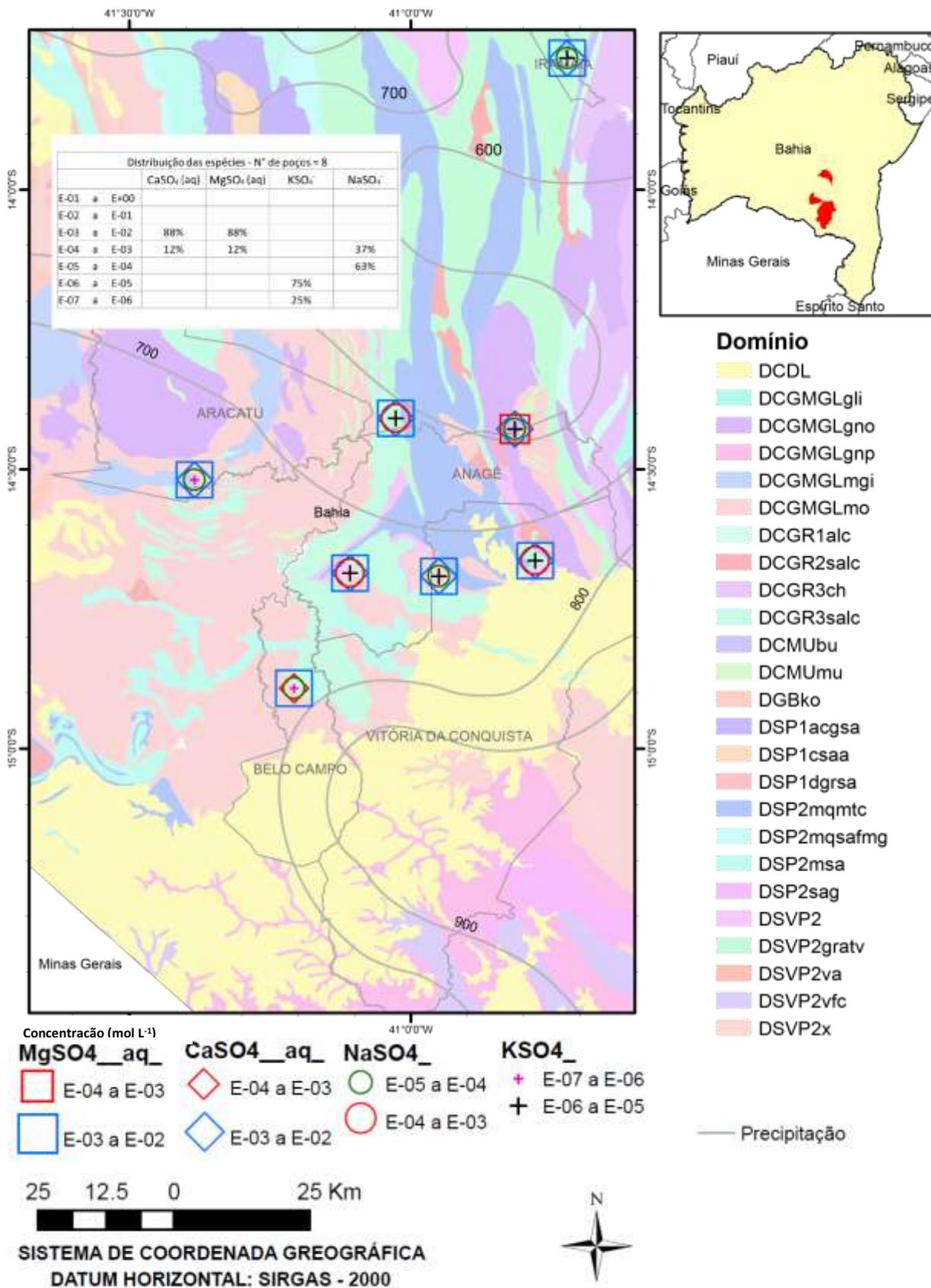
Domínio

- DCa
- DCAganc
- DCAsbalc
- DCDC
- DCDL
- DCGMGLgno
- DCGMGLgnp
- DCGMGLmgi
- DCGMGLmo
- DCGR1pal
- DCGR2salc
- DCGR3ch
- DCGR3pal
- DCGR3salc
- DCMUbu
- DCMUmu
- DCSR
- DGBko
- DGBss
- DGBvai
- DSMc
- DSMqcg
- DSMsmaq
- DSMscv
- DSP1acgsa
- DSP1csaa
- DSP1dgrsa
- DSP2mcsaa
- DSP2mqmtc
- DSP2sag
- DSVP2gratv
- DSVP2vfc
- DSVP2x

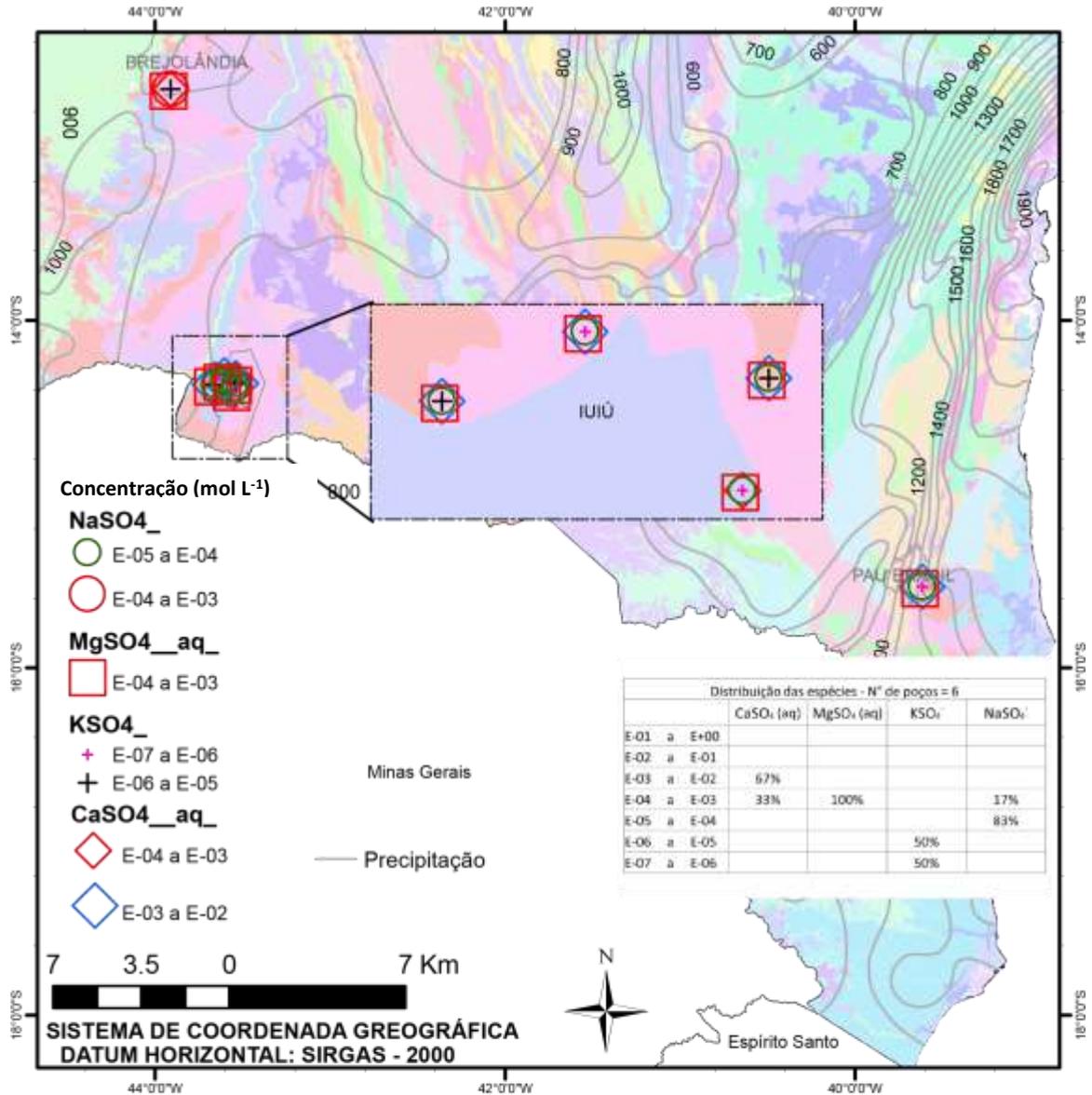
— Precipitação



Especiação química do sulfato no domínio metassedimentar leste – parte 3

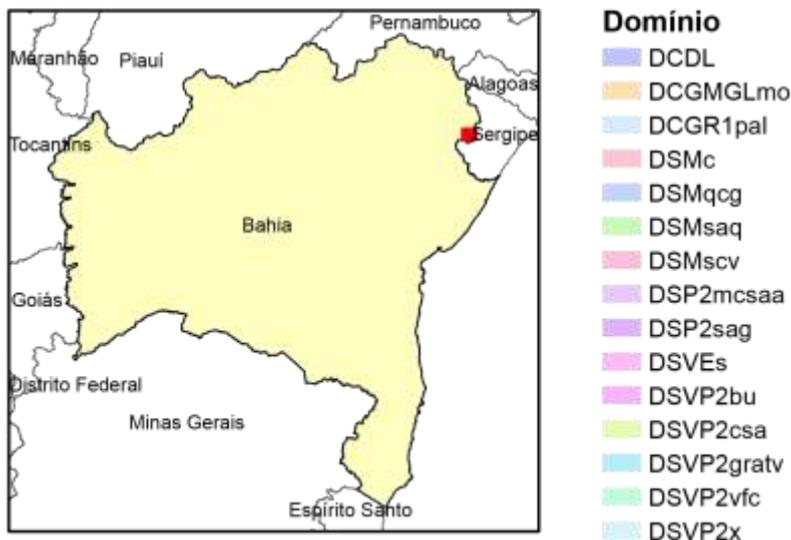
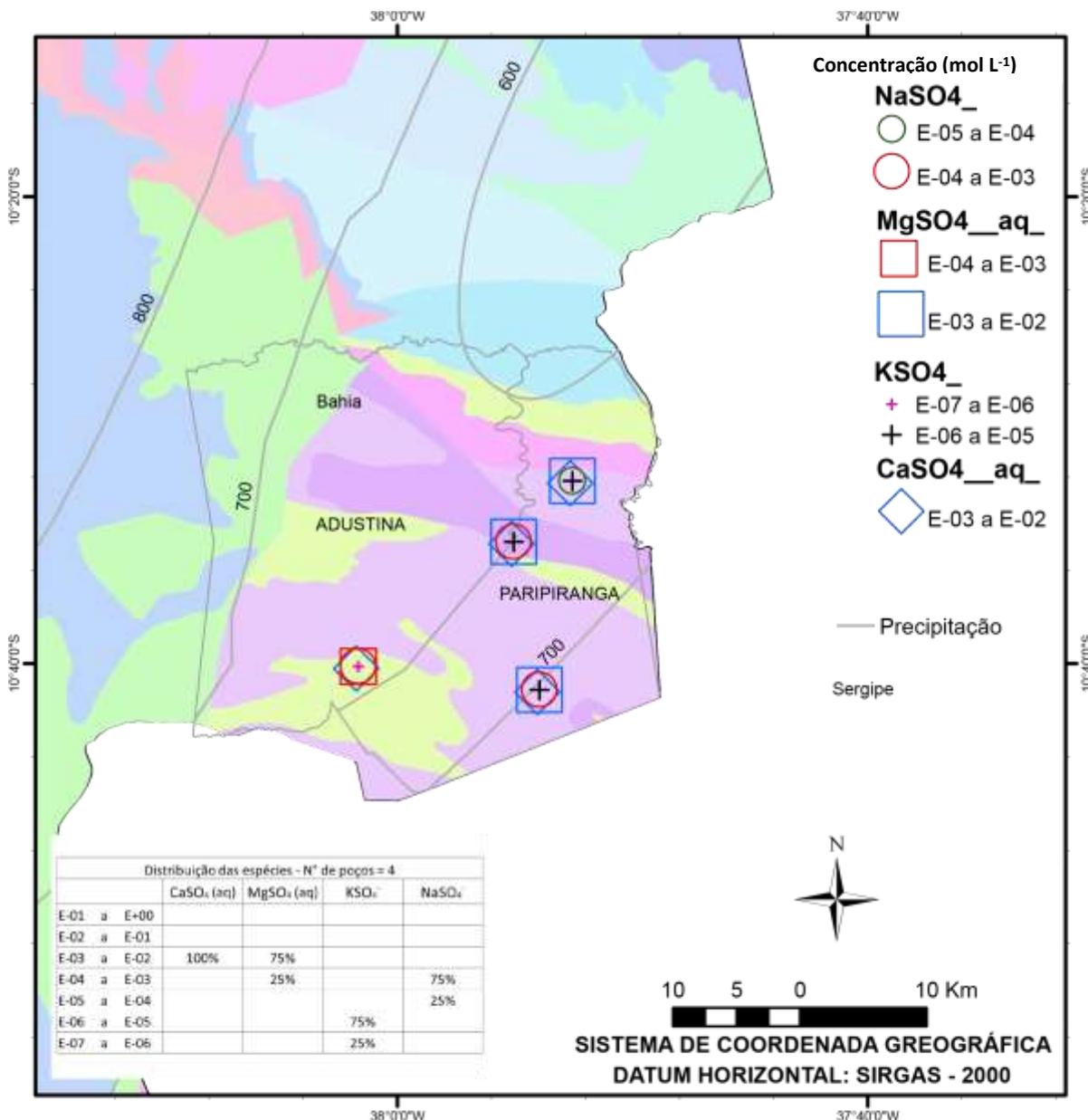


Especiação química do sulfato no domínio calcário oeste

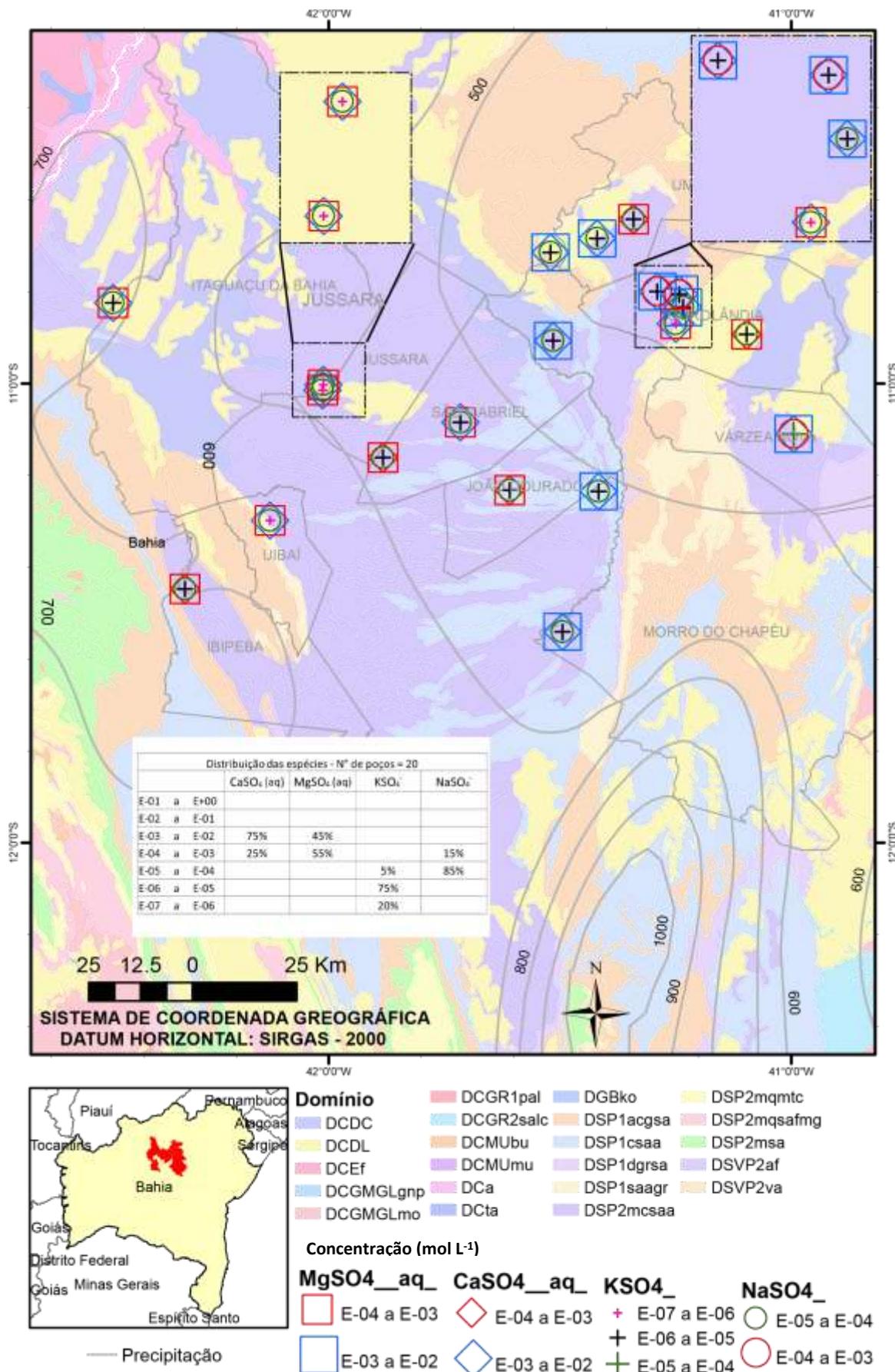


- Domínio**
- DCGR2pal
 - DCGR2salc
 - DCGR3ch
 - DCGR3salc
 - DCMUbu
 - DCMUmu
 - DCMa
 - DCSR
 - DCT
 - DCA
 - DCa
 - DCf
 - DCm
 - DCmc
 - DCta
 - DGBko
 - DGBss
 - DGBvs
 - DSMc
 - DSMqcg
 - DSMscv
 - DSP1acgsa
 - DSP1csaa
 - DSP1dgrsa
 - DSP1saagr
 - DSP2mcsaa
 - DSP2mcx
 - DSP2mqmtc
 - DSP2mqsafmg
 - DSP2msa
 - DSP2sag
 - DSVes
 - DSVP1vaa
 - DSVP2
 - DSVP2af
 - DSVP2gratv
 - DSVP2q
 - DSVP2va
 - DSVP2vfc
 - DSVP2x

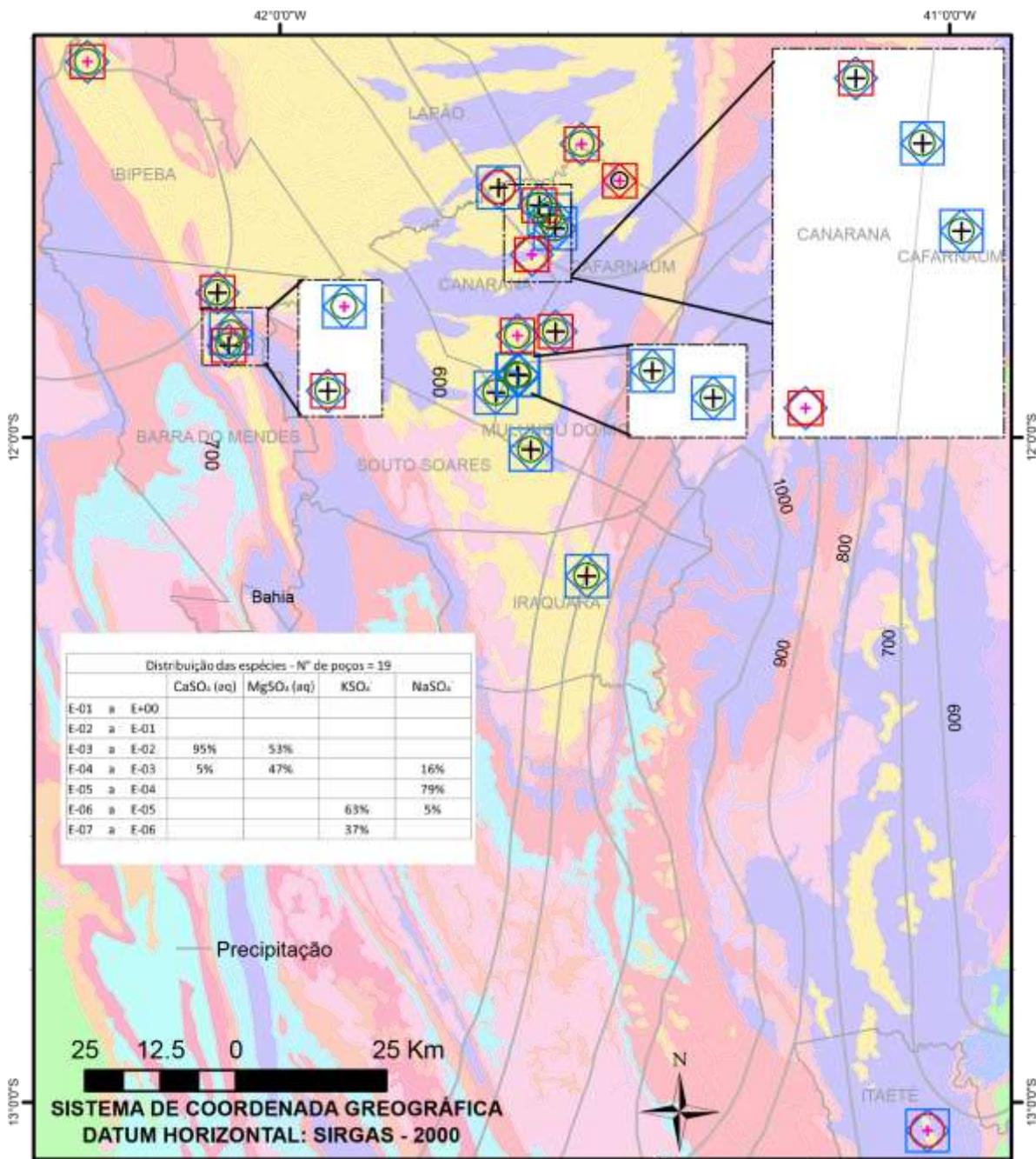
Especiação química do sulfato no domínio calcário Irecê – parte 1



Especiação química do sulfato no domínio calcário Irecê – parte 2



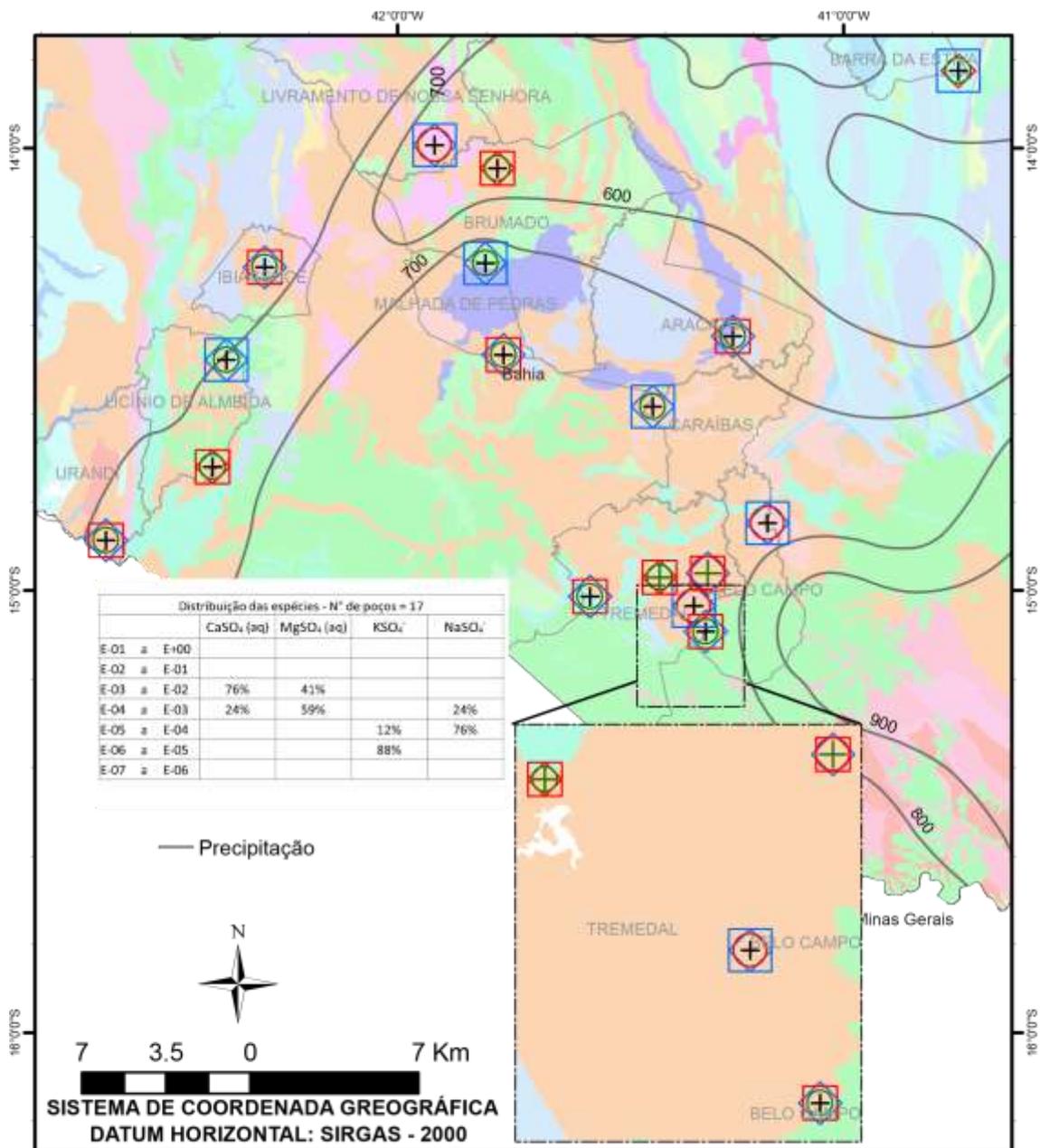
Especiação química do sulfato no domínio calcário Irecê – parte 3



- Domínio**
- DCa
 - DCDL
 - DCGMGLmo
 - DCGR1pal
 - DCGR2salc
 - DCMUmu
 - DSP2mcsaa
 - DGBvs
 - DSP1acgsa
 - DSP1cgsa
 - DSP1dgrsa
 - DSP1saagr
 - DSP2mqmtc
 - DSP2mqsafmg
 - DSP2msa
 - DSVP2va

- Concentração (mol L⁻¹)**
- NaSO₄_ MgSO₄_aq_ CaSO₄_aq_ KSO₄_**
- E-06 a E-05
 - E-04 a E-03
 - ◇ E-04 a E-03
 - + E-07 a E-06
 - E-05 a E-04
 - E-03 a E-02
 - ◇ E-03 a E-02
 - + E-06 a E-05

Especiação química do sulfato no domínio cristalino sudeste – parte 1

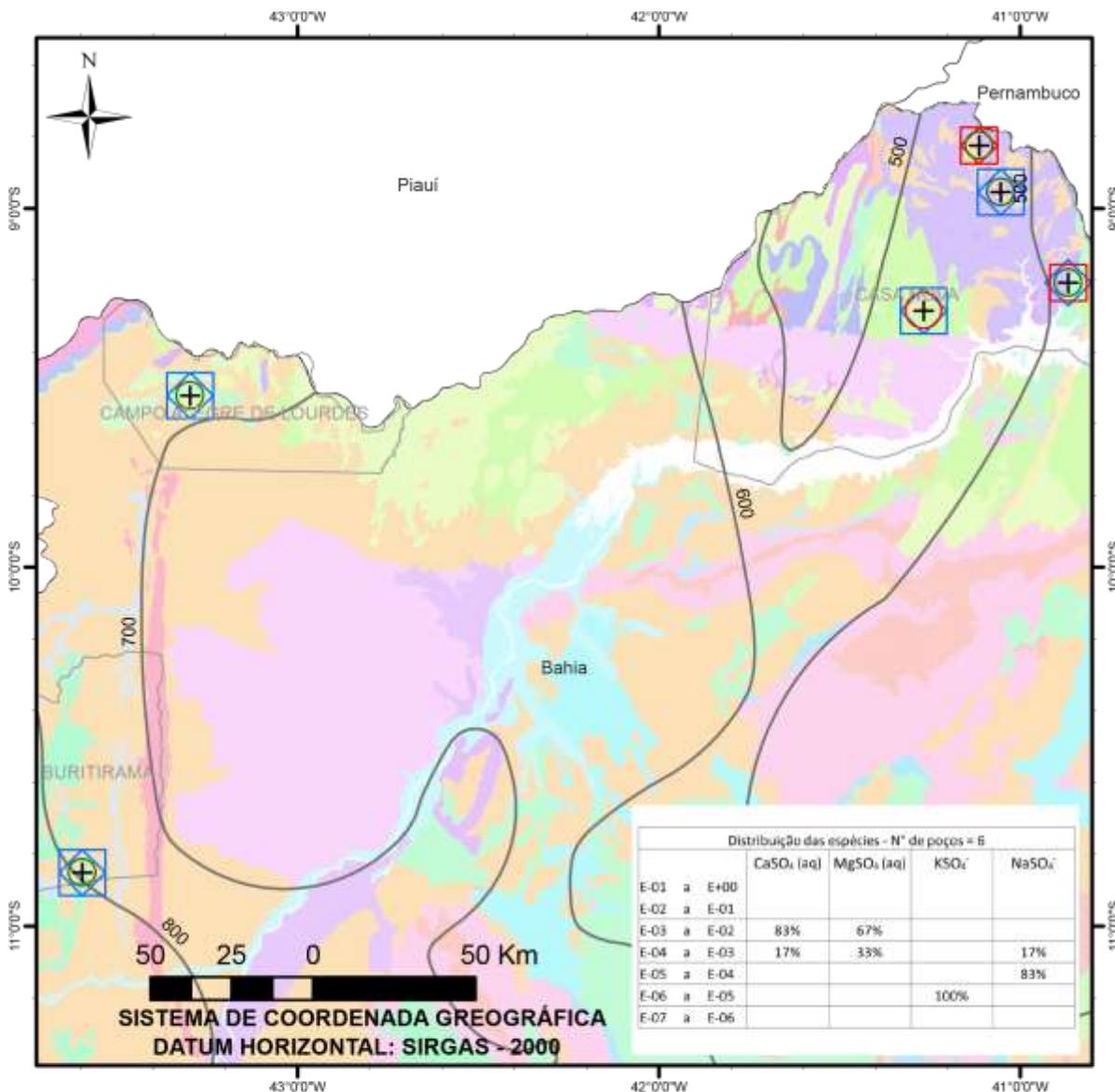


- Domínio**
- DCDL
 - DCGR1pal
 - DGBss
 - DCGMGLgli
 - DCGR2alc
 - DSP1acgsa
 - DCGMGLgno
 - DCGR2salc
 - DSP1csaa
 - DCGMGLgnp
 - DCGR3ch
 - DSP1dgrsa
 - DCGMGLmgi
 - DCGR3salc
 - DSP2mcx
 - DCMUbu
 - DCMUmqmtc
 - DSP2mqmfc
 - DCGMGLmo
 - DCMUmu
 - DSP2mqsafmg
 - DCGMGLmp
 - DCa
 - DSP2msa
 - DCGR1alc
 - DGBko
 - DSP2sag
 - DSVP1vaa
 - DSVP2
 - DSVP2af
 - DSVP2gratv
 - DSVP2q
 - DSVP2va
 - DSVP2vfc
 - DSVP2x

Concentração (mol L⁻¹)

- MgSO₄_aq_ CaSO₄_aq_ NaSO₄_ KSO₄_**
- E-04 a E-03
 - ◇ E-04 a E-03
 - E-05 a E-04
 - ⊕ E-06 a E-05
 - E-03 a E-02
 - ◇ E-03 a E-02
 - E-04 a E-03
 - ⊕ E-05 a E-04

Especiação química do sulfato no domínio cristalino sudeste – parte 2



— Precipitação

Concentração (mol L⁻¹)

NaSO₄_

- E-05 a E-04
- E-04 a E-03

MgSO₄_aq_

- E-04 a E-03
- E-03 a E-02

KSO₄_

- + E-06 a E-05
- + E-05 a E-04

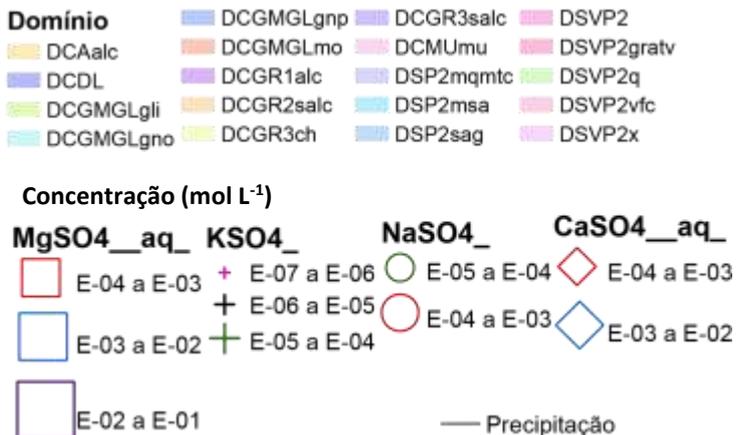
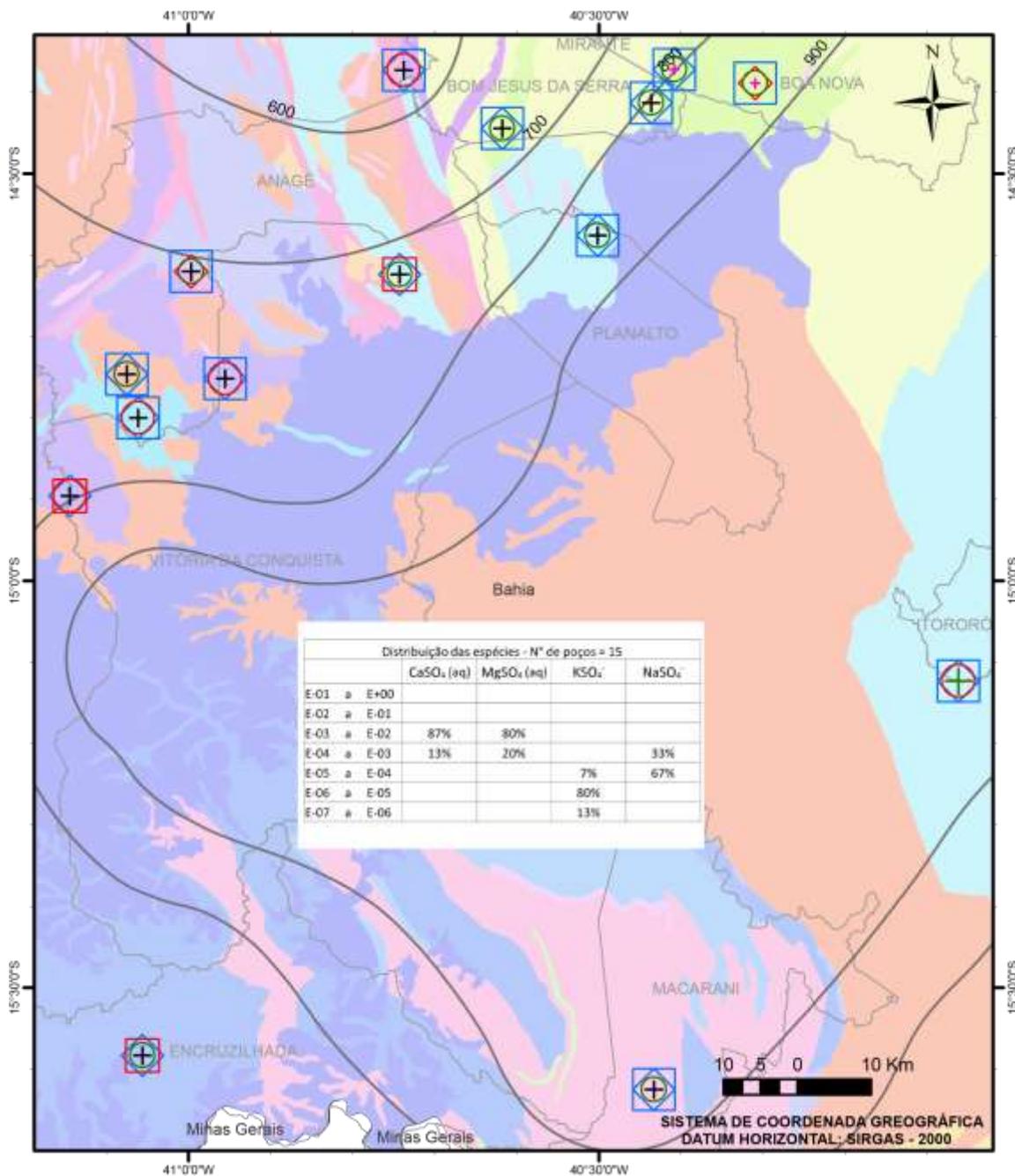
CaSO₄_aq_

- ◇ E-04 a E-03
- ◇ E-03 a E-02

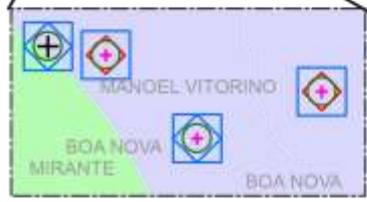
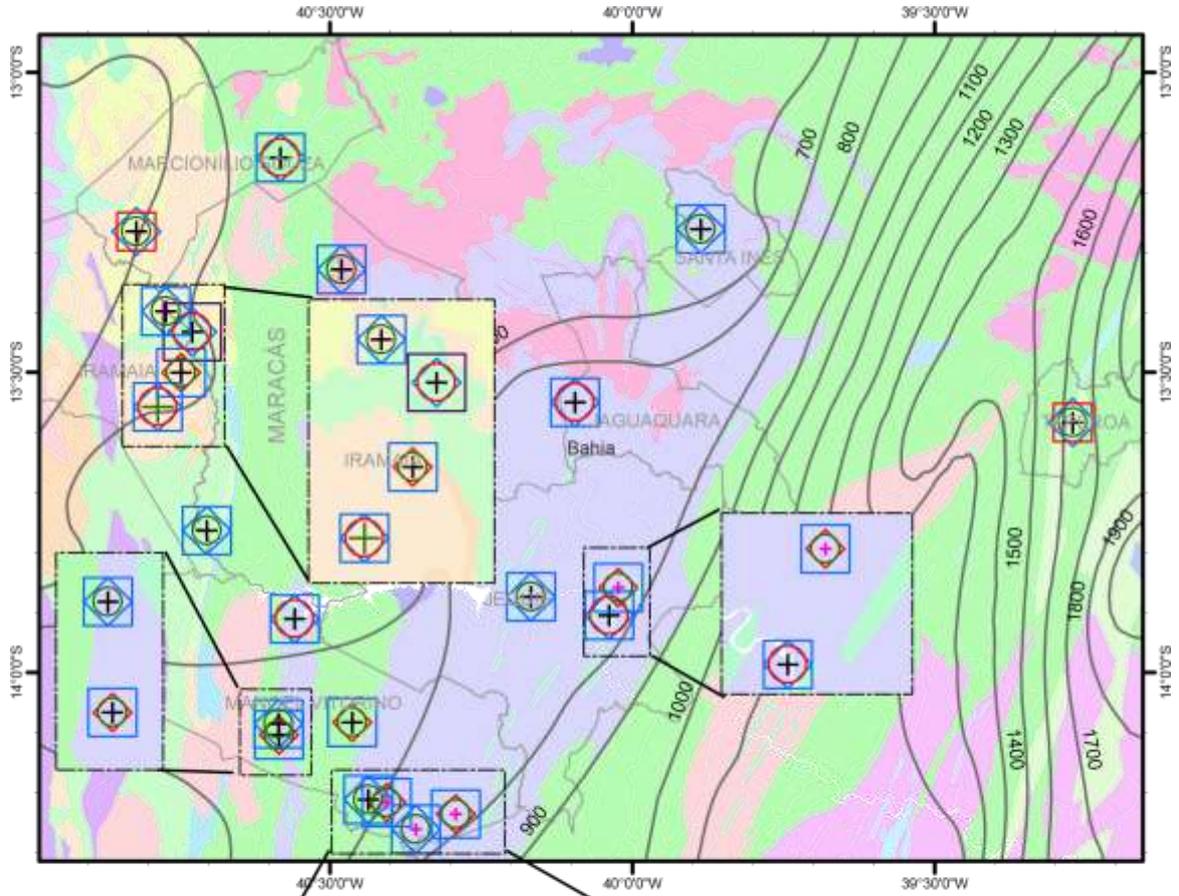
Domínio

- DCAalc
- DCAganc
- DCDC
- DCDL
- DCEf
- DCGMGLgno
- DCGMGLmgi
- DCGR2alc
- DCGR2salc
- DCGR3salc
- DCMUbu
- DCMUmu
- DCMUvb
- DCSR
- Dca
- Dcta
- DGBko
- DGBvai
- DSP1acgsa
- DSP1csaa
- DSP1dgrsa
- DSP1saagr
- DSP2mcsaa
- DSP2mqmtc
- DSP2mqsafmg
- DSP2msa
- DSP2sag
- DSVMPacg
- DSVMPasaf
- DSVMPsaa
- DSVP2af
- DSVP2csa
- DSVP2vfc

Especiação química do sulfato no domínio cristalino sul – parte 1



Especiação química do sulfato no domínio cristalino sul – parte 2



Distribuição das espécies - N° de poços = 22

	CaSO ₄ (aq)	MgSO ₄ (aq)	KSO ₄	NaSO ₄
E-01 a E-00				
E-02 a E-01		5%		
E-03 a E-02	73%	86%		
E-04 a E-03	27%	9%		27%
E-05 a E-04			5%	73%
E-06 a E-05			77%	
E-07 a E-06			18%	



- Domínio**
- DCMGLgno
 - DCGR3ch
 - DSP1csaa
 - DCAganc
 - DCMGLgnp
 - DCMUbu
 - DSP1dgrsa
 - DCDL
 - DCMGLmo
 - DCMUmu
 - DSP2mqmtc
 - DCGMGLgli
 - DCGR1alc
 - DCSR
 - DSVP2
 - DCGMGLglo
 - DCGR1pal
 - DCm
 - DSVP2gratv
 - DCGMGLglp
 - DCGR2salc
 - DSMqcg
 - DSVP2q

Concentração (mol L⁻¹)

- MgSO₄_aq_**

 - E-04 a E-03
 - E-03 a E-02
 - E-02 a E-01
- KSO₄_**

 - + E-07 a E-06
 - + E-06 a E-05
 - + E-05 a E-04
- CaSO₄_aq_**

 - ◇ E-04 a E-03
 - ◇ E-03 a E-02
- NaSO₄_**

 - E-05 a E-04
 - E-04 a E-03

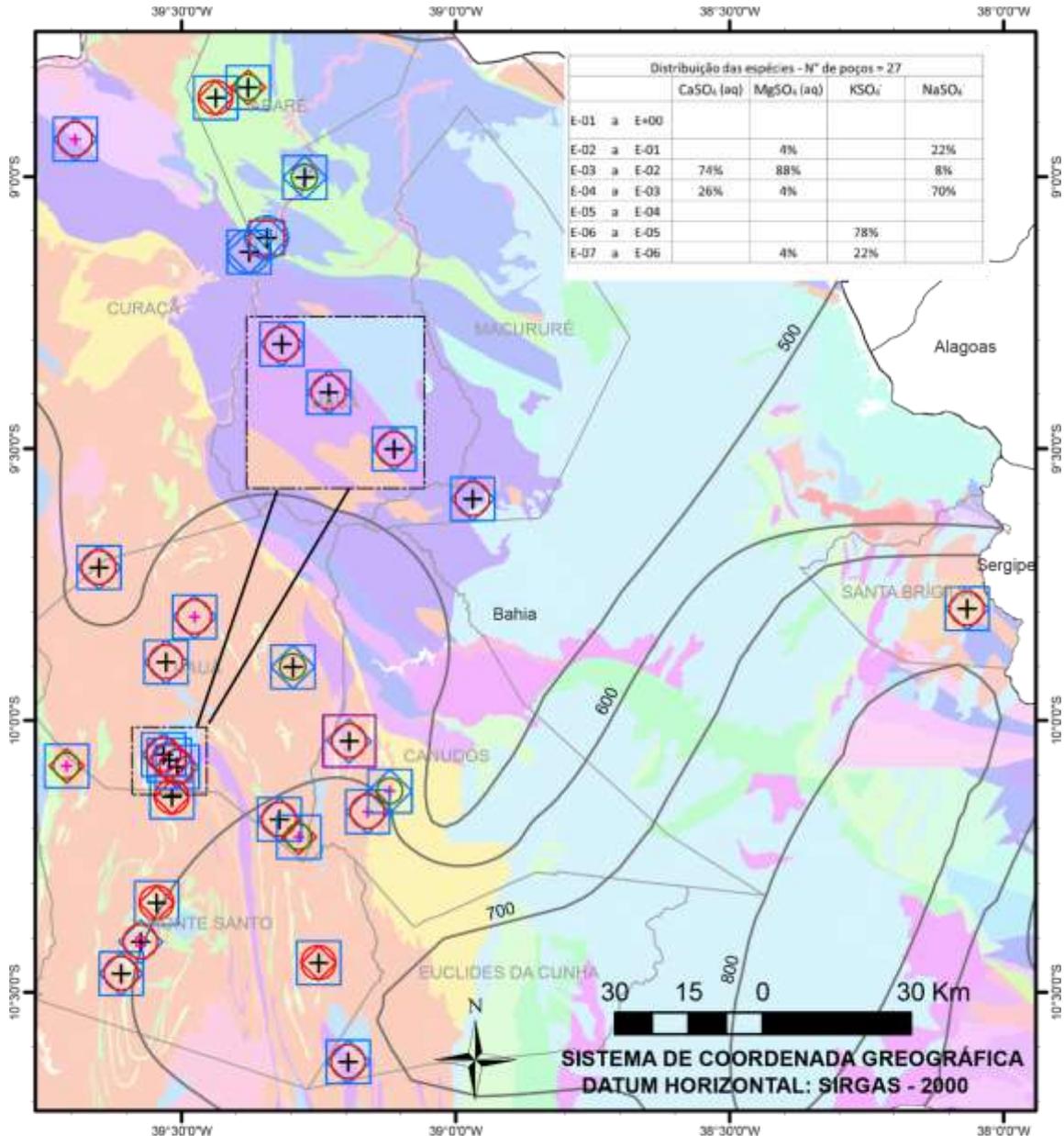


DATUM HORIZONTAL: SIRGAS - 2000
SISTEMA DE COORDENADA GEOGRÁFICA



— Precipitação

Especiação química do sulfato no domínio cristalino norte – parte 1

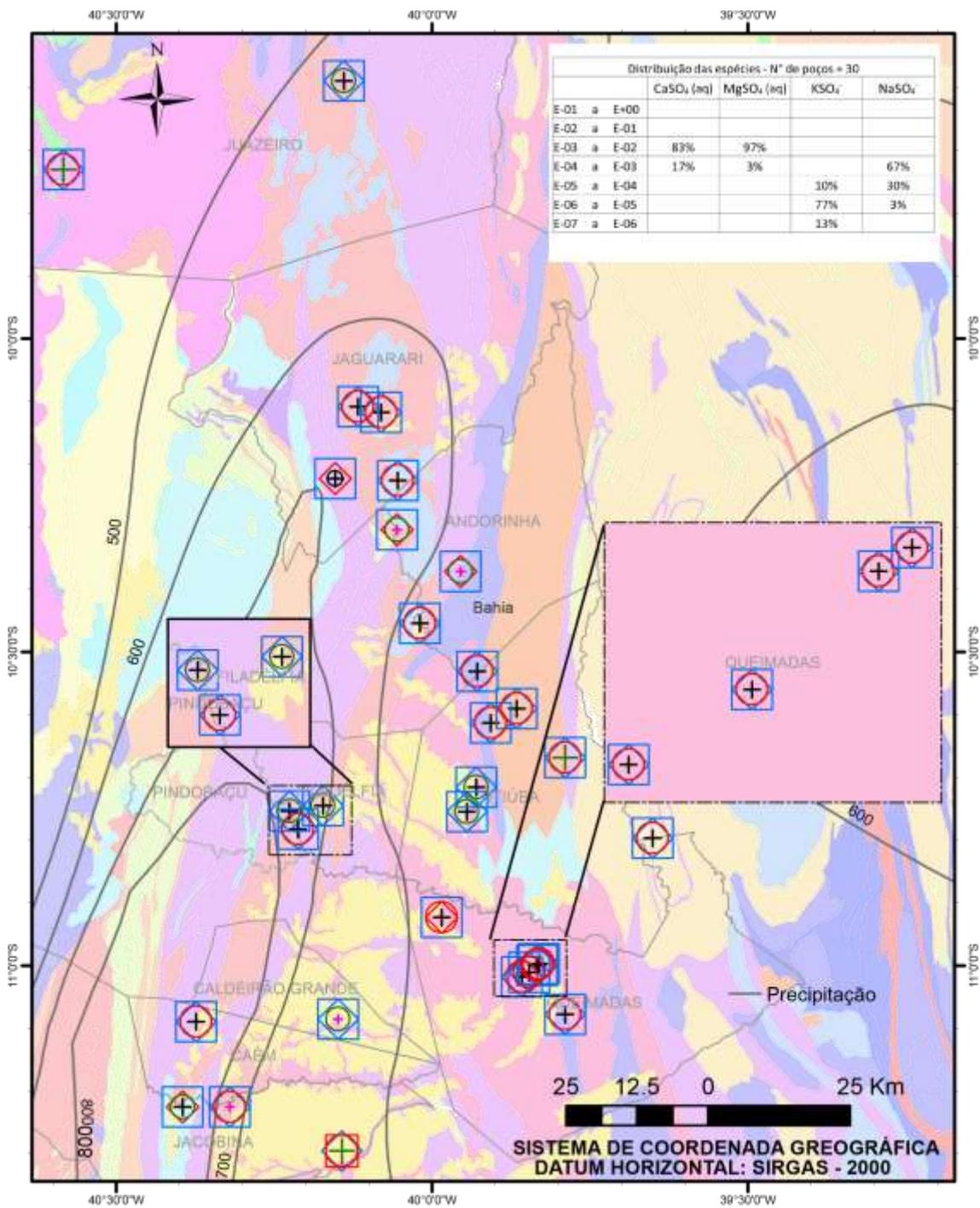


— Precipitação



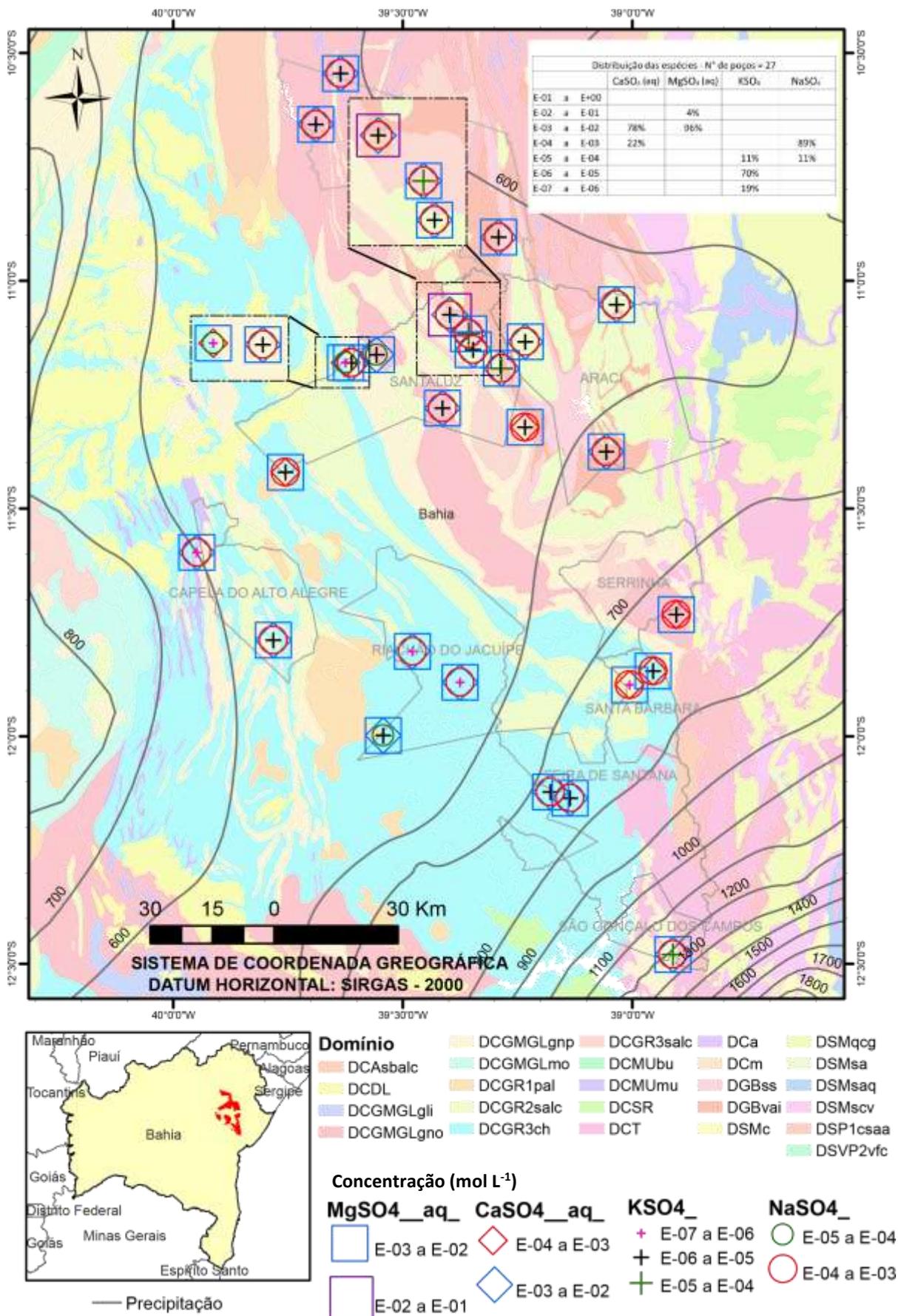
- Domínio**
- DCGR1pal
 - DGBss
 - DSP2mcsaa
 - DCAganc
 - DCGR2pal
 - DGBvai
 - DSP2sag
 - DCAsbalc
 - DCGR2salc
 - DSMc
 - DSVEs
 - DCDL
 - DCGR3pal
 - DSMqcg
 - DSVP2
 - DCGMGLgno
 - DCGR3salc
 - DSMsa
 - DSVP2bu
 - DCGMGLgnp
 - DCMUmU
 - DSMsaq
 - DSVP2csa
 - DCGMGLmgi
 - DCSR
 - DSMscv
 - DSVP2gratv
 - DCGR1alc
 - DCa
 - DSP1csaa
 - DSVP2vfc
 -
 - DSVP2x
- Concentração (mol L⁻¹)**
- MgSO₄_aq_ NaSO₄_ CaSO₄_aq_ KSO₄_**
- E-07 a E-06
 - E-05 a E-04
 - ◇ E-04 a E-03
 - + E-07 a E-08
 - E-04 a E-03
 - E-04 a E-03
 - ◇ E-03 a E-02
 - + E-06 a E-05
 - E-03 a E-02
 - E-03 a E-02
 -
 - E-02 a E-01

Especiação química do sulfato no domínio cristalino norte – parte 2

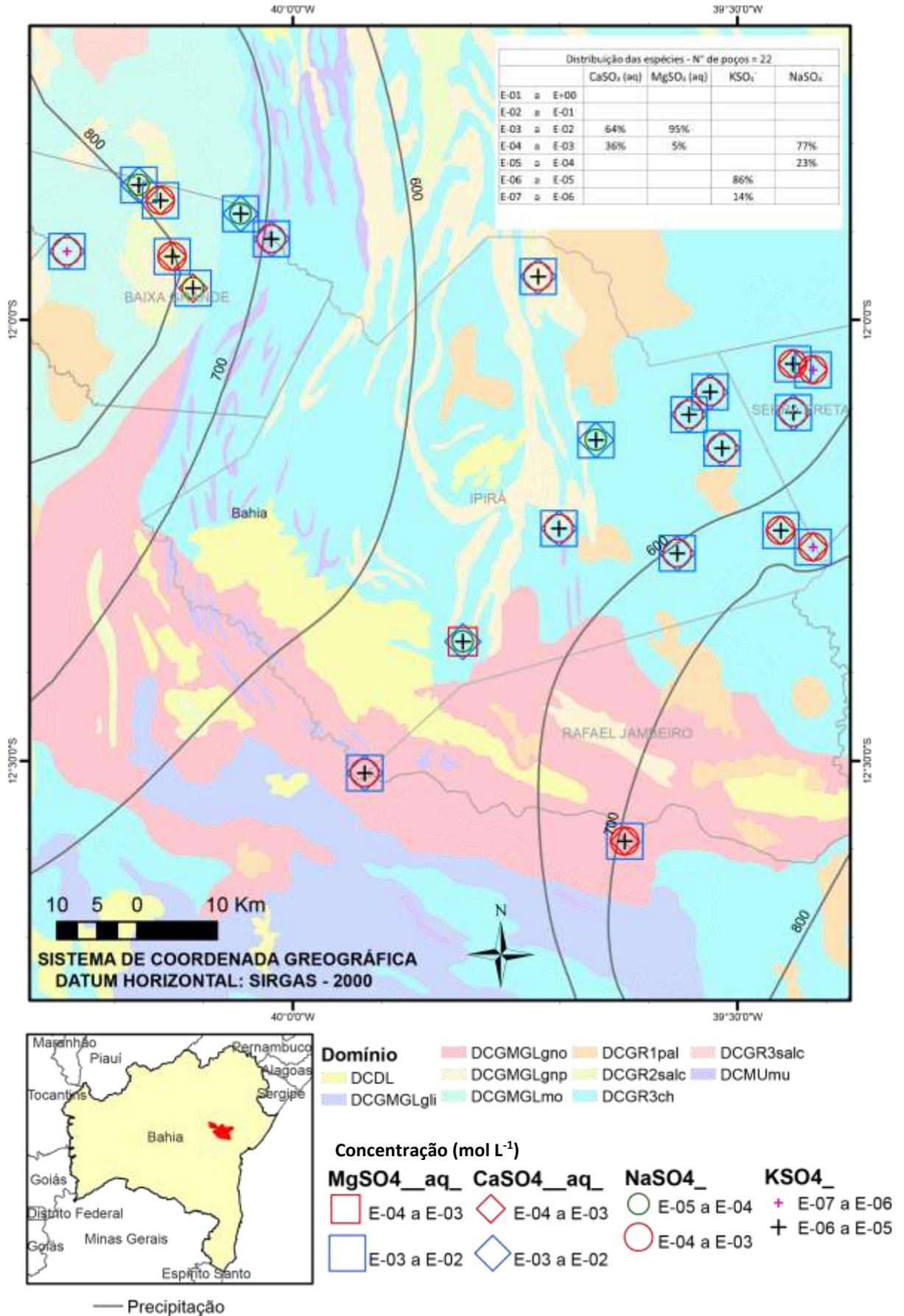


- Domínio**
- DCAGanc
 - DCGMGLgno
 - DCGR3ch
 - DGBss
 - DSP2mqmtc
 - DCAsalc
 - DCGMGLgnp
 - DCGR3salc
 - DGBvai
 - DSVP2gratv
 - DCDC
 - DCGMGLmgi
 - DCMUbu
 - DSP1acgsa
 - DSVP2vfc
 - DCDL
 - DCGR1pal
 - DCa
 - DSP1dgrsa
 - DSVP2x
 - DCGR2salc
 - DGBko
 - DSP2mcsaa
- Concentração (mol L⁻¹)**
- NaSO₄_** **KSO₄_** **MgSO₄_aq_** **CaSO₄_aq_**
- E-06 a E-05
 - + E-07 a E-06
 - E-04 a E-03
 - ◇ E-04 a E-03
 - E-05 a E-04
 - + E-06 a E-05
 - E-03 a E-02
 - ◇ E-03 a E-02
 - E-04 a E-03
 - + E-05 a E-04

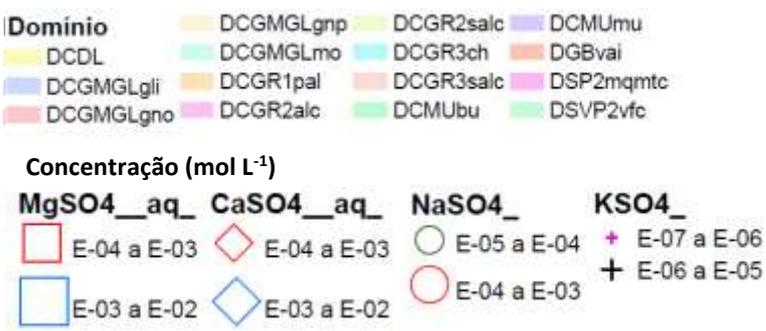
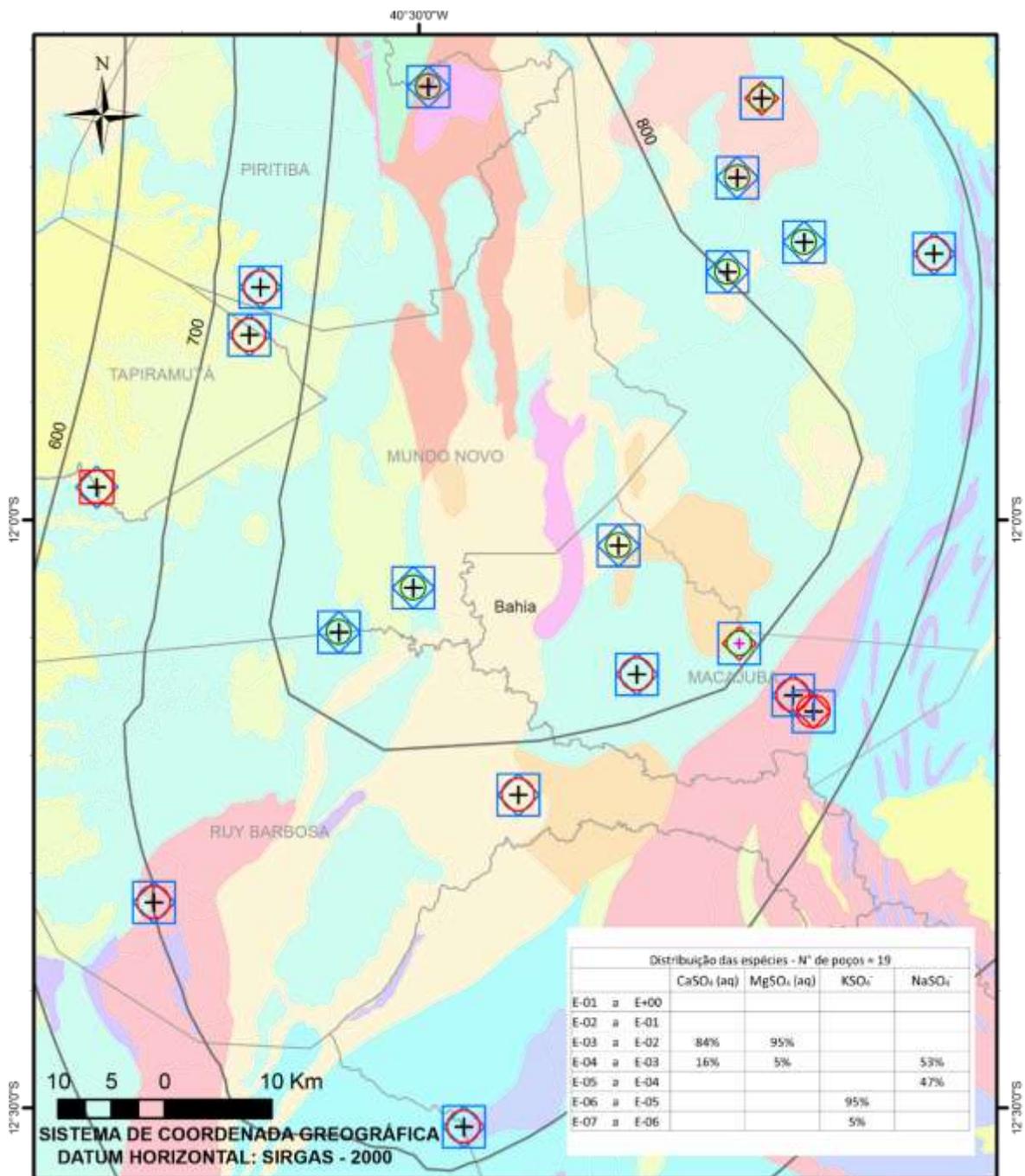
Especiação química do sulfato no domínio cristalino norte – parte 3



Especiação química do sulfato no domínio cristalino norte – parte 4



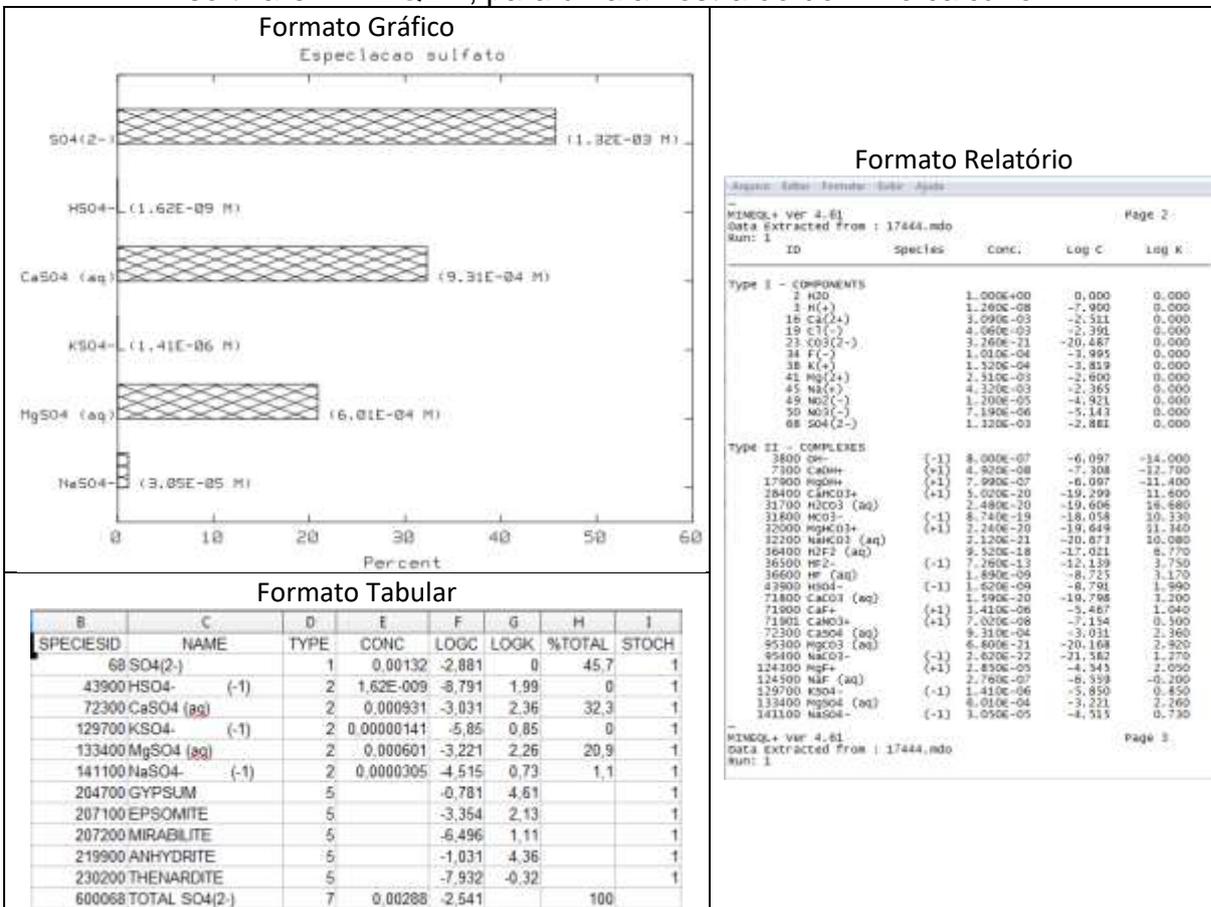
Especiação química do sulfato no domínio cristalino norte – parte 5



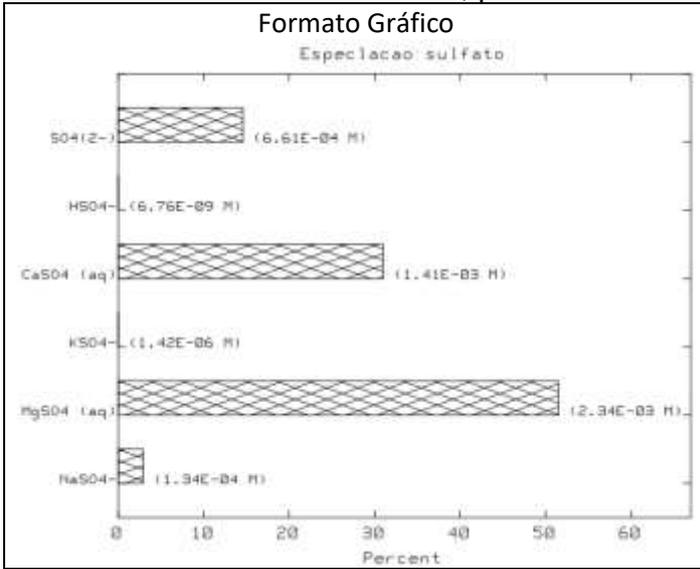
— Precipitação

APÊNDICE F

Resultado da especiação química do sulfato pelo método Tableau, através do software MINEQL+, para uma amostra do domínio calcário



Resultado da especiação química do sulfato pelo método Tableau, através do software MINEQL +, para uma amostra do domínio cristalino



Formato Tabular

B	C	D	E	F	G	H	I
SPECIESID	NAME	TYPE	CONC	LOGC	LOGK	%TOTAL	STOCH
68	SO4(2-)	1	0.000661	-3.18	0	14.6	1
43900	HSO4- (-1)	2	6.76E-009	-8.17	1.99	0	1
72300	CaSO4 (aq)	2	0.00141	-2.852	2.36	31	1
129700	KSO4- (-1)	2	0.00000142	-5.849	0.85	0	1
133400	MgSO4 (aq)	2	0.00234	-2.631	2.26	51.5	1
141100	NaSO4- (-1)	2	0.000134	-3.874	0.73	2.9	1
204700	GYPSUM	5		-0.602	-4.61		1
207100	EPSOMITE	5		-2.764	2.13		1
207200	MIRABILITE	5		-4.914	1.11		1
219900	ANHYDRITE	5		-0.852	-4.36		1
230200	THENARDITE	5		-6.35	-0.32		1
600068	TOTAL SO4(2-)	7	0.00454	-2.343		100	

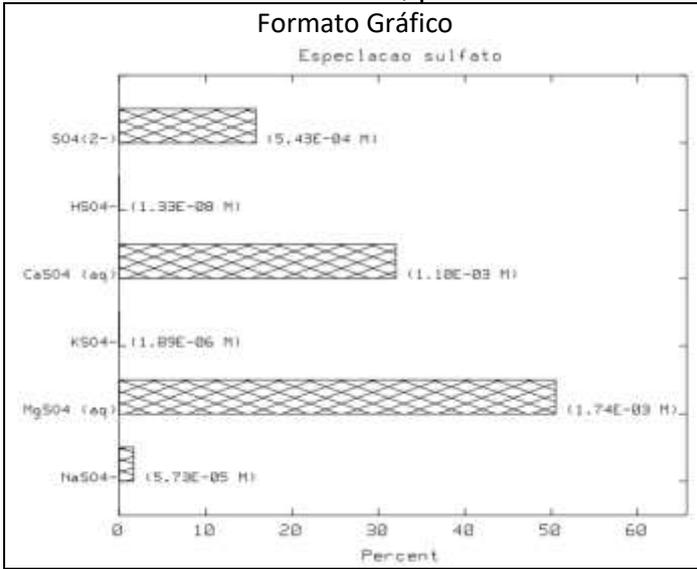
Formato Relatório

MINEQL+ ver 4.61
 Data Extracted from : 16774.sdb
 Run: 1

Species	Conc.	Log C	Log K
Type I - COMPONENTS			
H2O	1.000E+00	0.000	0.000
H(+)	1.030E-07	-6.980	0.000
Ca(2+)	9.280E-03	-2.032	0.000
Cl(-)	8.040E-02	-1.095	0.000
CO3(2-)	6.810E-09	-8.167	0.000
F(-)	8.890E-06	-5.051	0.000
K(+)	3.030E-04	-3.519	0.000
Mg(2+)	1.940E-02	-1.711	0.000
Na(+)	3.770E-02	-1.424	0.000
NO2(-)	8.910E-07	-6.050	0.000
NO3(-)	2.050E-04	-3.688	0.000
SO4(2-)	6.610E-04	-3.180	0.000
Type II - COMPLEXES			
OH(-)	9.620E-08	-7.017	-14.000
CaOH(+)	1.780E-08	-7.749	-12.700
MgOH(+)	7.440E-07	-6.128	-12.400
CaHCO3(+)	2.630E-06	-5.580	-11.600
MgCO3(aq)	3.580E-06	-5.446	16.680
HCO3(-)	1.520E-05	-4.816	10.330
MgHCO3(+)	3.010E-06	-5.519	12.340
MgHCO3(aq)	5.220E-07	-6.492	10.080
H2S(aq)	5.080E-18	-17.294	6.770
H2S(-)	4.660E-14	-13.332	3.750
HF(aq)	1.380E-09	-8.861	3.170
HSO4(-)	6.760E-09	-8.170	1.990
CaCD3(aq)	1.000E-07	-6.999	3.200
CaF(+)	9.010E-07	-6.045	1.040
CaMg3(+)	6.020E-06	-5.221	0.500
CaSO4(aq)	1.410E-03	-2.852	1.360
MgCO3(aq)	1.100E-07	-6.958	2.920
NaCO3(-)	4.780E-09	-8.321	1.270
Mg+	1.940E-02	-1.712	2.050
NaF(aq)	2.110E-07	-6.675	-0.250
KSO4(-)	1.420E-06	-5.849	0.850
MgSO4(aq)	2.340E-03	-2.631	2.260
NaSO4(-)	1.340E-04	-3.874	0.730

MINEQL+ ver 4.61
 Data Extracted from : 16774.sdb
 Run: 1

Resultado da especiação química do sulfato pelo método Tableau, através do software MINEQL +, para uma amostra do domínio metassedimentar



Formato Tabular

B	C	D	E	F	G	H	I
SPECIESID	NAME	TYPE	CONC	LOGC	LOGK	%TOTAL	STOCH
68	SO4(2-)	1	0.000543	-3.265	0	15.8	1
43900	HSO4- (-1)	2	1.33E-008	-7.875	1.99	0	1
72300	CaSO4 (aq)	2	0.0011	-2.958	2.36	32	1
129700	KSO4- (-1)	2	0.00000189	-5.723	0.85	0	1
133400	MgSO4 (aq)	2	0.00174	-2.761	2.26	50.5	1
141100	NaSO4- (-1)	2	0.0000573	-4.242	0.73	1.7	1
204700	GYPSSUM	5		-0.708	4.61		1
207100	EPSOMITE	5		-2.894	2.13		1
207200	MIRABILITE	5		-5.565	1.11		1
219900	ANHYDRITE	5		-0.958	4.36		1
230200	THENARDITE	5		-7.001	-0.32		1
600068	TOTAL SO4(2-)	7	0.00344	-2.463		100	

Formato Relatório

MINEQL+ Ver 4.81
Data Extracted From : 17700.mdo
Run: 1

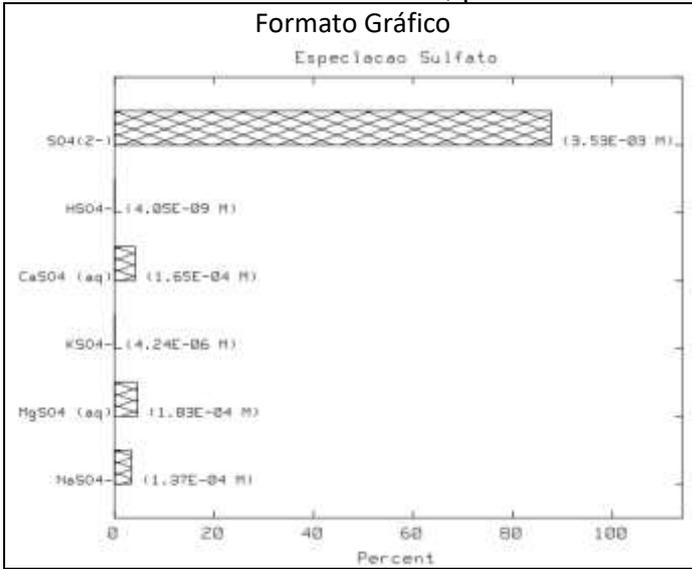
Page 2

ID	species	conc.	Log C	Log K
Type I - COMPONENTS				
1	H2O	1.000E+00	0.000	0.000
3	H(+)	2.510E-07	-6.600	0.000
16	Ca(+2)	8.860E-03	-2.053	0.000
19	Cl(-)	6.090E-02	-1.215	0.000
23	CO3(2-)	9.690E-23	-22.014	0.000
34	F(-)	2.890E-06	-5.540	0.000
38	K(+)	4.920E-04	-3.308	0.000
41	Mg(2+)	1.740E-02	-1.756	0.000
45	Na(+)	1.960E-02	-1.707	0.000
49	NO2(-)	2.190E-07	-6.622	0.000
50	NO3(-)	7.120E-05	-4.148	0.000
66	SO4(2-)	5.430E-04	-3.265	0.000
Type II - COMPLEXES				
7800	OH-	(-1) 4.010E-08	-7.397	-14.000
7300	CaOH+	(+1) 7.080E-09	-8.150	-22.700
17900	MgOH+	(+1) 2.800E-07	-6.553	-11.400
28400	CaMCO3+	(+1) 8.160E-20	-19.067	-21.600
31700	H2CO3 (aq)	(+1) 2.930E-19	-18.533	-16.886
31800	KCO3-	(-1) 5.190E-19	-18.285	-10.336
32000	MgMCO3+	(+1) 9.130E-20	-19.030	-11.340
32300	NaMCO3 (aq)	(+1) 5.730E-21	-20.241	-10.080
36400	H2F2 (aq)	(+1) 3.080E-18	-17.511	6.770
36500	HF2-	(-1) 1.180E-14	-13.929	3.750
36600	HF (aq)	(+1) 1.070E-09	-8.970	3.170
43900	HSO4-	(-1) 1.330E-08	-7.875	1.990
71800	CaCO3 (aq)	(-1) 1.180E-21	-20.966	1.200
71900	CaF+	(+1) 2.790E-07	-6.554	1.040
71901	CaMCO3+	(+1) 6.510E-07	-6.186	0.500
72300	CaSO4 (aq)	(+1) 1.100E-03	-2.958	2.360
95100	MgCO3 (aq)	(-1) 1.420E-21	-20.849	2.920
95400	NaCO3-	(-1) 1.540E-23	-22.450	1.270
114500	MgF+	(+1) 3.690E-06	-5.243	2.050
134500	NaF (aq)	(+1) 3.590E-08	-7.448	-0.200
139700	KSO4-	(-1) 1.890E-06	-5.723	0.850
133400	MgSO4 (aq)	(+1) 1.740E-02	-2.761	2.260
141100	NaSO4-	(-1) 5.730E-05	-4.242	0.730

Page 3

MINEQL+ Ver 4.81
Data Extracted From : 17700.mdo
Run: 1

Resultado da especiação química do sulfato pelo método Tableau, através do software MINEQL +, para uma amostra do domínio sedimentar



Formato Tabular

B	C	D	E	F	G	H	I
SPECIESID	NAME	TYPE	CONC	LOGC	LOGK	%TOTAL	STOCH
68	SO4(2-)	1	0.00353	-2.452	0	87.8	1
43900	HSO4-	(-1)	4.05E-009	-8.392	1.99	0	1
72300	CaSO4 (aq)	2	0.000165	-3.781	2.36	4.1	1
129700	KSO4-	(-1)	0.00000424	-5.372	0.85	0	1
133400	MgSO4 (aq)	2	0.000183	-3.737	2.26	4.6	1
141100	NaSO4-	(-1)	0.000137	-3.864	0.73	3.4	1
204700	GYPSSUM	5		-1.531	4.61		1
207100	EPSOMITE	5		-3.87	2.13		1
207200	MIRABILITE	5		-5.622	1.11		1
219900	ANHYDRITE	5		-1.781	4.36		1
230200	THENARDITE	5		-7.058	-0.32		1
600068	TOTAL SO4(2-)	7	0.00402	-2.396		100	

Formato Relatório

Appcon Editor Formater Editor View

MINEQL+ Ver 4.61 Page 2
 Data Extracted From : I7168.edo
 Run: 1

ID	Species	Conc.	Log C	Log K
Type I - COMPONENTS				
2	H2O	1.000E+00	0.000	0.000
3	H(+)	1.170E-08	-7.930	0.000
16	Ca(2+)	2.050E-04	-3.689	0.000
19	Cl(-)	2.120E-03	-2.674	0.000
23	CO3(2-)	3.820E-23	-20.418	0.000
34	F(-)	1.420E-05	-4.849	0.000
38	K(+)	1.700E-04	-3.770	0.000
41	Mg(2+)	2.850E-04	-3.545	0.000
45	Na(+)	7.210E-03	-2.142	0.000
49	NO2(-)	2.170E-07	-6.664	0.000
50	NO3(-)	1.610E-05	-4.793	0.000
66	SO4(2-)	3.330E-03	-2.452	0.000
Type II - COMPLEXES				
3800	OH-	(-1) 8.370E-07	-6.087	-14.000
7300	CaOH+	(+1) 3.300E-09	-8.456	-12.700
17900	MgOH+	(+1) 9.730E-08	-7.012	-11.400
28400	CaHCO3+	(+1) 3.650E-21	-20.438	11.600
31700	H2CO3 (aq)	2.330E-20	-19.587	18.688
31800	HCO3-	(-1) 9.580E-19	-18.019	10.130
32000	MgHCO3+	(+1) 2.800E-21	-20.554	11.340
32200	NaHCO3 (aq)	3.890E-21	-20.411	10.089
36400	H2F2 (aq)	1.620E-19	-18.798	9.770
36500	HF2-	(-1) 1.320E-14	-13.878	3.750
36600	HF (aq)	2.460E-10	-9.609	3.170
43900	HSO4-	(-1) 4.050E-09	-8.392	1.990
71800	CaCO1 (aq)	1.240E-25	-20.807	1.200
71900	CaF-	(+1) 3.160E-08	-7.500	1.040
71901	CaHPO4	(+1) 1.040E-08	-7.983	0.500
72300	CaSO4 (aq)	1.650E-04	-3.781	2.360
95300	MgCO3 (aq)	9.070E-22	-21.043	2.920
95400	NaCO1-	(-1) 5.130E-22	-21.290	1.270
124300	MgF+	(+1) 4.330E-07	-6.344	2.050
124300	NaF (aq)	6.440E-08	-7.191	-0.300
133400	KSO4-	(-1) 4.240E-06	-5.372	0.850
133400	MgSO4 (aq)	1.830E-04	-3.737	2.260
141100	NaSO4-	(-1) 1.370E-04	-3.864	0.730

MINEQL+ Ver 4.61 Page 3
 Data Extracted From : I7168.edo
 Run: 1