



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO COMPARATIVO ENTRE OS
MEMBROS DA FORMAÇÃO SÃO SEBASTIÃO, RECÔNCAVO
NORTE - BA

JAMILLE EVANGELISTA ALVES

SALVADOR

2015

**ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO COMPARATIVO ENTRE OS
MEMBROS DA FORMAÇÃO SÃO SEBASTIÃO, RECÔNCAVO
NORTE - BA**

Jamille Evangelista Alves

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

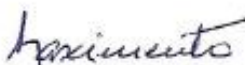
2015

JAMILLE EVANGELISTA ALVES

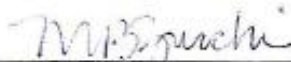
**“ESTUDO HIDROGEOQUÍMICO COMPARATIVO ENTRE OS
MEMBROS DA FORMAÇÃO SÃO SEBASTIÃO, RECÔNCAVO
NORTE - BA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 03/11/2015.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento
Orientador – IGEO/UFBA



Dra. Maria do Rosário Zucchi
Examinador Externo – IF/ UFBA



Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz
Examinador Interno – IGEO/UFBA

Salvador – BA
2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, saúde e oportunidade de estudar. Ao meu pai, Roberto, minha mãe, Irlandia, e minha irmã, Tamilly pelo amor, carinho, confiança e apoio constante.

Agradeço ao professor Sérgio Augusto de Moraes Nascimento pela oportunidade de ser, mais uma vez, sua orientanda. Por ser sempre atencioso, compreensivo e disponível.

Aos amigos do NEHMA: Hailton, Danilo, Luís Rogério, Liliane, Thiago, Lucas (Alemão), Carlos (Calabresa), Clélia, Paulo Ricardo (Rebelde), Raissa, Rivaldo, Leandro, Daniela, Renilda, Tiara.

Aos funcionários da Embasa: Carlos Ramires, Mario May, Antônio Mariano, Andrey dos Santos, Aldair Dias, Flávia Lisboa.

A CERB, em especial: Peixinho, Cristovaldo, Carolina, Alda.

Aos grandes colaboradores das atividades desenvolvidas nos laboratórios do Igeo: Salles, Nea, Mônica, Bonfim, Rodrigo e, especialmente, Jorginho, Sarah Rocha e Ricardo Almeida.

Ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada: Alexandre Barreto, Tércio H. Santos, Danilo Teles, José Roberto. Em especial, a professora Maria Zucchi, pelo cuidado, atenção e disposição em ajudar.

Aos colegas-amigos: Nelize, Henrique, Enaldo, Ricardo, Rodrigo Nascimento, Fabiane, Maria Clara, Natália, André, Gleide, Sheila Sueli.

Aos membros da banca examinadora pelas correções e sugestões.

A Capes pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento deste projeto!

RESUMO

Este trabalho buscou identificar e caracterizar os tipos de águas subterrâneas em função dos fácies hidrogeoquímicos e das suas relações iônicas características tentando-se associar, se possível, com os três membros da Formação São Sebastião. Para desenvolver a caracterização hidroquímica das águas foram amostrados 17 poços da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. e para complementar a área foram utilizados 11 poços, além dos amostrados, cadastrados no banco de dados do SIAGAS/CPRM que continham dados de análises físico-químicas e perfil litológico do poço. A classificação das águas foi realizada através do Diagrama Triangular de Piper e dos Sólidos Totais Dissolvidos. Para estabelecer a qualidade das águas para consumo humano e seu padrão de potabilidade foi empregada a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011 e enquadramento através da Resolução Conama nº 396 de 3 de abril de 2008. O diagrama de Lemoine (1954) foi usado para determinar a qualidade das águas para a irrigação e o quadro de Mathess (1982), Szikszay (1993) e Driscoll (1986) para identificar a qualidade das águas para diversos ramos da indústria. No intuito de auxiliar as análises dos resultados da química da água foi aplicado o sumário estatístico, a correlação de Spearman e a análise da variância (ANOVA), posteriormente, complementada pelo método de Tukey. Os índices de saturação da fase mineral e a especiação química dos elementos foram desenvolvidos com o intuito de identificar a tendência de dissolução ou precipitação de uma determinada fase mineral. Foram realizadas análises isotópicas de δD , $\delta^{18}O$ e $\delta^{13}C_{CID}$, para se tentar identificar possíveis interações existentes e a origem dessas águas.

Palavras-chave: Hidroquímica, Isótopos ambientais, ANOVA.

ABSTRACT

This study aimed to identify and characterize the types of groundwater dependent on the hydrogeochemical facies and its ionic ratios characteristics trying to associate, if possible, with the three members of Formation San Sebastian. To develop the hydrochemical characterization of water sampled 17 wells of Bahian Company for Water and Sanitation SA and to complement the area were used 11 wells, in addition to sampled, registered in database SIAGAS / CPRM containing physical-chemical data and lithology of the well profile. The classification of waters was performed using the Triangular Piper Diagram and Total Dissolved Solids. To establish the quality of water for human consumption and its potability standards was used to Ordinance No. 2914 of the Ministry of Health of December 12, 2011 and framework through Resolution CONAMA 396 of 3 April 2008. The diagram Lemoine (1954) was used to determine the quality of water for irrigation and the Mathess frame (1982), Szikszay (1993) and Driscoll (1986) to identify the quality of water for all branches of industry. To assist the analysis of the results of water chemistry was applied statistical summary, the Spearman correlation and analysis of variance (ANOVA), later supplemented by the Tukey method. The saturation levels of the mineral phase, and the chemical speciation of the elements were developed in order to identify the tendency to dissolution or precipitation of a mineral phase determined. Isotopic analyzes were performed δD , $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$, to try to identify possible existing interactions and the origin of these waters.

Keywords: hydrochemistry, environmental isotopes, ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização e situação dos municípios.....	18
Figura 2.1: Mapa de solos.....	21
Figura 2.2: Carta estratigráfica.....	24
Figura 2.3: Paleogeografia <i>sin-rift</i> da bacia do recôncavo.....	25
Figura 2.4: Mapa geológico local.....	26
Figura 2.5: Coluna composta pelos Membros Rio Joanes e Passagem dos Teixeiras da Formação São Sebastião na região de Camaçari-Dias D'Ávila.....	35
Figura 2.6: Frequência dos tipos de águas.....	38
Figura 2.7: Mapa potenciométrico regional do sistema aquífero Recôncavo Norte.....	39
Figura 2.8: Mapa potenciométrico local.....	40
Figura 3.1: Fluxograma representativo das principais etapas da pesquisa.....	41
Figura 3.2: Localização dos poços estudados.....	43
Figura 4.1: Diagrama Triangular de Piper e a classificação das águas subterrâneas.....	49
Figura 4.2: Classificação em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos.....	50
Figura 5.1: Distribuição do ferro nas amostras. A linha vermelha indica o limite máximo permitido pelas resoluções de 0,3 mg/L.....	51
Figura 5.2: Diagrama de Lemoine (1954) do USSL.....	53
Figura 6.1: Distribuição dos fácies hidroquímicos identificados.....	61
Figura 8.1: Relação entre os índices de saturação e o pH para as fases minerais do íon Ca.....	75
Figura 8.2: Relação entre os índices de saturação e o pH para as fases minerais do íon Mg.....	76
Figura 9.1: Efeito do fracionamento isotópico para o ¹⁸ O em reservatórios de água.....	79
Figura 9.2: Linha meteórica global (LMG).....	80
Figura 9.3: Esquema de fracionamento isotópico do ¹³ C durante mudança de equilíbrio do carbono entre o CO ₂ , CID e a calcita a 25°C.....	83
Figura 9.4: Faixa de valores do δ ¹³ C de compostos e materiais encontrados na natureza.....	83

Figura 9.5: Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ x δD das amostras de água coletadas em comparação com a LMG das amostras de água de precipitação de várias partes do mundo (Rozanski et al., 1993).....	87
Figura 9.6: Gráfico Sólidos totais dissolvidos x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	88
Figura 9.7: Gráfico Sólidos totais dissolvidos x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, sem o ponto S1.....	88
Figura 9.8: Gráfico Profundidade x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	89
Figura 9.9: Gráfico condutividade elétrica x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	90
Figura 9.10: Gráfico condutividade elétrica x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, sem o ponto S1.....	90
Figura 9.11: Gráfico pH x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	91
Figura 9.12: Gráfico profundidade x condutividade elétrica.....	92
Figura 9.13: Gráfico profundidade x condutividade, sem o ponto S1.....	92
Figura 9.14: Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ x condutividade elétrica.....	93
Figura 9.15: Distribuição isotópica do CID.....	94
Figura 9.16: Distribuição isotópica do deutério.....	95
Figura 9.17: Distribuição isotópica do oxigênio-18.....	96
Figura 9.18: Distribuição isotópica do excesso de deutério.....	97

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1: Incrustações ferruginosas na forma de manchas irregulares da Formação Barreiras localizadas ao sul da Cetrel.....	28
Fotografia 2.2: Nível grosseiro da Formação Marizal com presença de argilas brancas.....	28
Fotografia 2.3: Contato inclinado entre as Formações São Sebastião e Marizal. No detalhe, capa laterítica no contato com gretas de ressecamento.....	29
Fotografia 2.4: Paleocanal da Formação São Sebastião.....	30
Fotografia 3.1: Poço tubular amostrado.....	44
Fotografia 3.2: Multiparâmetro e frasco utilizado para armazenamento da amostra.....	44
Fotografia 3.3: Ensaio analítico para determinação do cloreto.....	45
Fotografia 3.4: Ensaio analítico para determinação de alcalinidade.....	45
Fotografia 3.5: Reagente e cubetas utilizados na análise de sulfatos.....	45
Fotografia 3.6: Espectrofotômetro molecular U5100 Hitachi.....	45
Fotografia 3.7: Espectrômetro de massas de razão isotópica.....	46
Fotografia 3.8: Finningan GasBench.....	46
Fotografia 3.9: Vial, ácido e seringa utilizados na preparação de amostras para análise de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	47
Fotografia 3.10: Amostras preparadas inseridas no Finningan GasBench.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros hidrogeológicos médios de poços do aquífero São Sebastião.....	37
Tabela 3.1: Poços utilizados na pesquisa.....	42
Tabela 5.1: Resultados analíticos das águas subterrâneas.....	52
Tabela 5.2: Resultado da classificação das águas para irrigação.....	54
Tabela 5.3: Parâmetros estabelecidos para a qualidade da água na indústria.....	55
Tabela 7.1: Sumário estatístico para os parâmetros físico-químicos.....	62
Tabela 7.2: Matriz de correlação de Sperman.....	66
Tabela 7.3: ANOVA para o cloreto.....	68
Tabela 7.4: ANOVA para o sulfato.....	68
Tabela 7.5: ANOVA para o sódio.....	68
Tabela 7.6: ANOVA para o potássio.....	69
Tabela 7.7: ANOVA para a condutividade elétrica.....	69
Tabela 7.8: ANOVA para o silício.....	69
Tabela 7.9: ANOVA para o bicarbonato.....	70
Tabela 7.10: ANOVA para o cálcio.	70
Tabela 7.11: ANOVA para o magnésio.....	70
Tabela 9.1: Valores isotópicos de δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ e d	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Municípios contemplados pelas bacias hidrográficas.....	19
Quadro 4.1: Definição de águas doces, salobra e salina.....	50
Quadro 6.1: Relações iônicas e classe das águas subterrâneas para o fácies hidroquímico cloretada.....	58
Quadro 6.2: Relações iônicas e classe das águas subterrâneas para o fácies hidroquímico bicarbonatada.....	59
Quadro 7.1: Estudo comparativo entre as médias dos membros da Formação São Sebastião.....	72
Quadro 7.2 Estudo comparativo entre as médias dos membros da Formação São Sebastião.....	73

LISTA DE SIGLAS

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica

Alc – Alcalinidade

ANA – Agência Nacional das Águas

Cl⁻ - Cloreto

CO₃²⁻ – Carbonato

CID – Carbono Orgânico Dissolvido

CE – Condutividade Elétrica

CERB – Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia

CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa Mineral

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

D – Deutério

d – Excesso de Deutério

DIC - Dissolved Inorganic Carbon

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMBASA – Empresa Baiana de Águas e Saneamento

Eh - potencial de oxi-redução

HCO₃⁻ – Bicarbonato

IS – Índice de Saturação

IAEA - International Atomic Energy Agency

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INEMA – Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

g/L – Grama por litro

Km - Quilômetro

LEPETRO – Laboratório de Estudos do Petróleo

LFNA – Laboratório de Física Nuclear Aplicada

L - Litro

LMG – Linha Meteórica Global

mm – Milímetro

m - Metro

m³/h – Metro cúbico por hora.

mg/L – Miligrama por litro

meq/L – Miliequivalente por litro

mS – Milisiemens

NEA – Núcleo de Estudos Ambientais

OD – Oxigênio Dissolvido

pH – potencial hidrogeniônico

RAS – Razão de Absorção do Sódio

SEI – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

STD – Sólidos Totais Dissolvidos

SAR – Sodium Adsorption Ratio

SO₄²⁻ - Sulfato

UEP – Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento.

USSL – United States Salinity Laboratory

VMP - Valores Máximos Permitidos

°C – Graus Celsius

δ - valor delta

‰ - partes por mil

μl - Micro litro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.1 INTRODUÇÃO.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo Geral.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS.....	18
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO REGIONAL.....	19
2.1 HIDROGRAFIA E ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	19
2.2 SOLOS.....	20
2.3 GEOMORFOLOGIA.....	22
2.4 GEOLOGIA REGIONAL.....	22
2.5 GEOLOGIA LOCAL.....	25
2.5.1 Depósitos de Sedimentos Inconsolidados do Quaternário.....	27
2.5.2 Formação Barreiras.....	27
2.5.3 Formação Marizal.....	27
2.5.4 Formação São Sebastião.....	29
2.5.4.1 Membro Rio Joanes.....	31
2.5.4.2 Membro Passagem dos Teixeiras.....	31
2.5.4.3 Membro Paciência.....	31
2.5.6 Grupo Ilhas.....	31
2.6 ZONEAMENTO DE LITOFÁCIES.....	32
2.7 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS.....	36
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
CAPÍTULO 4 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS.....	48
4.1 DIAGRAMA DE PIPER.....	48
4.2 SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS.....	50
CAPÍTULO 5 – QUALIDADE DAS ÁGUAS.....	51

5.1 POTABILIDADE.....	51
5.2 IRRIGAÇÃO.....	53
5.3 INDÚSTRIAS.....	55
CAPÍTULO 6 – RELAÇÕES IÔNICAS CARACTERÍSTICAS.....	57
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	62
7.1 SUMÁRIO ESTATÍSTICO.....	62
7.2 CORRELAÇÃO DE SPEARMAN.....	65
7.3 ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA).....	66
7.4 TESTE DE TUKEY.....	71
CAPÍTULO 8 – ÍNDICE DE SATURAÇÃO, FASE MINERAL E ESPECIAÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS.....	74
8.1 ANÁLISE DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO.....	75
8.2 ESPECIAÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS.....	76
CAPÍTULO 9 – COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	78
9.1 ORIGEM DOS CARBONATOS DISSOLVIDOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	81
9.2 RESULTADOS DOS VALORES ISOTÓPICOS.....	85
CAPÍTULO 10 - CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS.....	102

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve um grande crescimento na utilização das águas subterrâneas na Bahia, isto porque o seu uso oferece uma série de vantagens em relação às águas superficiais, dentre elas destaca-se o custo reduzido de captação e distribuição, e o fato de estarem mais protegidas da poluição antrópica que os mananciais superficiais. Ainda assim, a grande maioria das sedes dos municípios baianos são abastecidas por mananciais superficiais (73% do total), sendo as águas subterrâneas responsáveis pelo abastecimento de 19% dos municípios, e os sistemas mistos, por 8% das sedes urbanas (ANA, 2010¹).

As cidades de Camaçari, Mata de São João e Dias d'Ávila tem como manancial atual de abastecimento urbano e industrial as águas subterrâneas do aquífero São Sebastião. Enquanto que Simões Filho é abastecida por uma rede superficial e mista (ANA, 2010²).

De acordo com IBGE (1999), o aquífero São Sebastião apresenta um potencial hidrogeológico muito bom devido ao conjunto de associação entre a litologia, solos, relevo, vegetação, pluviometria e taxa de infiltração.

Estudos anteriores revelaram que na área do Polo Industrial de Camaçari as águas do aquífero São Sebastião são classificadas como cloretadas sódicas, cloretadas cálcicas-magnesianas, bicarbonatadas sódicas e bicarbonatadas cálcicas-magnesianas (NASCIMENTO e ALVES, 2011). Acredita-se que estas variações tipológicas da água subterrânea estejam relacionadas com o tipo e o ambiente de sedimentação flúvio-deltáico que originou as litologias dos membros que compõem esta Formação.

Segundo Lima (1999), na área estudada, a Formação São Sebastião foi compartimentada em três membros: Paciência, membro inferior, constituídos de arenitos no qual inclui uma camada composta por folhelhos pretos carbonosos, contendo lentes de calcário oolítico, ricas em fósseis de ostracóides, gastrópodos, lamelibrânquios e restos de vertebrados; Passagem

dos Teixeiras, membro médio, constituído de arenitos que se apresentam interestratificados com siltitos, arenitos finos argilosos e raros calcários; Rio Joanes, membro superior, composto de arenitos pobremente fossilífero.

Desta forma, como hipótese de trabalho, acredita-se ser possível identificar os fácies hidroquímicos relacionados com os membros da Formação São Sebastião. A evolução ocorreria de águas cloretadas sódicas para águas bicarbonatadas em profundidades maiores.

Leão (2003) constatou que a dinâmica da água subterrânea no aquífero São Sebastião é bastante complexa, pois as características hidráulicas variam, consideravelmente, devido aos falhamentos que cortam e dividem o aquífero em muitos blocos. Esse autor realizou análises de radiocarbono para identificação do tempo de residência da água onde identificou que esta varia de “recente” a 19.300 anos. Essas variações são resultantes da recarga local facilitada pela presença de arenitos grosseiros e a captação de água realizada em grandes profundidades, respectivamente.

As águas subterrâneas desta Formação também se apresentam saturadas em ferro e, em alguns locais, por sílica (SiO_2) e bicarbonato (ALVES, 2012). Essa saturação pode precipitar e causar formação de mineralizações e incrustações nos sistemas hidráulicos além de causar algumas doenças ao organismo humano. DELVIN (1998) afirma que o acúmulo de ferro no fígado, no pâncreas e no coração pode levar a cirrose e tumores hepáticos, diabetes *mellitus* e insuficiência cardíaca. O excesso de silício pode contribuir na formação de cálculos renais (ALVARENGA, 2015).

1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista o grau de importância socioeconômico da água para a sociedade, o desenvolvimento deste estudo se faz necessário para a atualização e ampliação dos conhecimentos acerca das características hidrogeológicas/hidroquímicas do aquífero São Sebastião na região metropolitana de Salvador. Destacando sua dimensão, potencialidade e qualidade das águas que armazena. Além disso, os resultados obtidos poderão ser utilizados pelo

poder público para o planejamento de abastecimento de muitas localidades com condições hidrogeológicas similares.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Identificar e caracterizar as águas subterrâneas da região em função dos tipos, dos fácies hidrogeoquímicos e das suas relações iônicas características tentando-se associar, se possível, com os três membros da Formação São Sebastião. Caracterizar a qualidade dessas águas e estabelecer a origem e as inter-relações espaciais desses membros através das análises isotópicas.

1.3.2 Objetivos Específicos

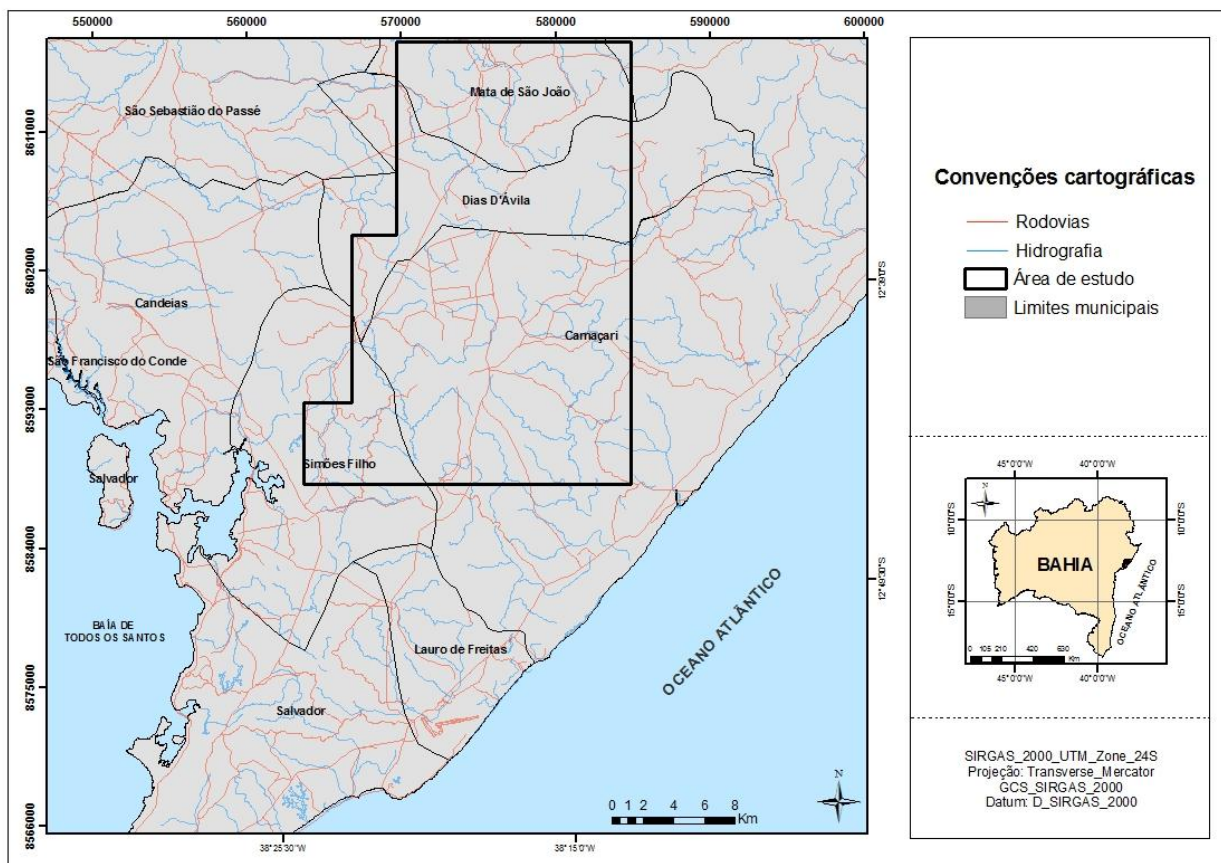
- Classificar ou tipificar as águas utilizando diagramas hidroquímicos;
- Avaliar a qualidade das águas subterrâneas de acordo com os valores de referência estabelecidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde e classificar através da Resolução do Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente) n° 396/2008;
- Avaliar a qualidade das águas para fins de irrigação utilizando o diagrama de Lemoine (1954);
- Avaliar a qualidade das águas para fins de utilização em diversos setores e segmentos industriais definido por Mathess (1982), Szikazay (1993) e Dricoll (1986);
- Analisar a composição isotópica de deutério (δD) oxigênio-18 ($\delta^{18}O$) e carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}C_{CID}$);
- Avaliar a especiação química dos elementos principais contidos na água subterrânea, notadamente, cálcio, magnésio, sódio, potássio, carbonato e bicarbonato;

- Estabelecer o modelamento hidrogeoquímico com os dados do índice de saturação (IS) da fase mineral na água subterrânea;
- Realizar a análises estatísticas básicas e multivariadas com os dados analíticos.

1.4 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo localiza-se na porção leste da Bacia Sedimentar do Recôncavo Norte. Abrange uma área de, aproximadamente, 498 km² e engloba parte de quatro municípios: Camaçari, Dias D'Ávila, Mata de São João e Simões Filho (Figura 1.1).

Figura 1.1: Mapa de localização e situação dos municípios.



Fonte: CPRM, 2004.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO REGIONAL

2.1 HIDROGRAFIA E ASPECTOS CLIMÁTICOS

A rede hidrográfica da região de estudo engloba as Bacias Hidrográficas dos rios Joanes e Jacuípe (Quadro 2.1). Os principais afluentes destes rios são:

- Rio Joanes: rio Ipitanga, Riacho São Francisco, rio Jacaréacanga, Riacho Uberaba, rio Lamarão e rio Sucuricanga.
- Rio Jacuípe: rio Imbassaí, rio Capivara Grande, rio Jacumirim, Riacho das Pedras e rio Saburá.

Ocorrem ainda pequenas bacias costeiras independentes que se dispõem no sentido NO-SE com padrão dendrítico a subparalelo relativamente denso (IBGE, 1999).

Quadro 2.1: Municípios contemplados pelas bacias hidrográficas.

Bacia Hidrográfica	Manancial	Município Contemplado pela Bacia Hidrográfica
Rio Jacuípe	Rio Jacuípe	Camaçari Dias d'Ávila Mata de São João
Rio Joanes	Rio Joanes	Simões Filho

Fonte: INEMA, 2014.

A região estudada, localizada na faixa Atlântica, apresenta clima úmido a subúmido com temperaturas variando, anualmente, em média de 18° a 25°C e com precipitação média anual entre 1100 a 2000 mm, podendo atingir níveis superiores. A pluviosidade decresce tanto no sentido leste-oeste quanto nos extremos norte-sul embora os níveis pluviométricos se mantenham

significativos. O tipo úmido a subúmido revelam índices de umidade que variam de 0 a 80% (INMET, 1992 e SEI, 1998).

2.2 SOLOS

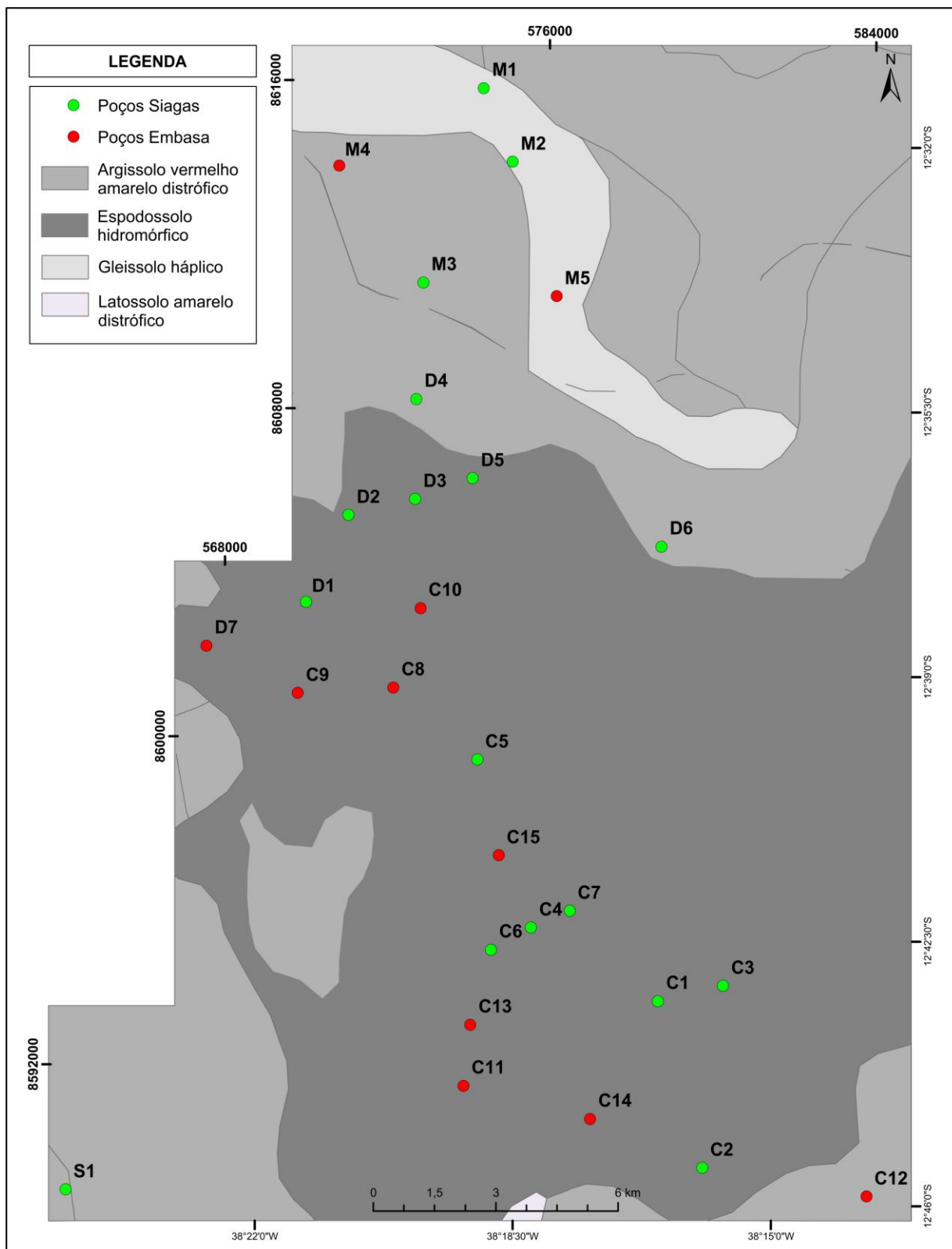
Segundo a Embrapa (2012), os solos que predominam na área são: os argissolos, espodossolos, gleissolos, neossolos e latossolos (Figura 2.1). Os argissolos compreendem solos nos quais, normalmente, o teor de argila no horizonte B (subsuperficial) é bem maior que no horizonte A (superficial), caracterizando o horizonte B textural (Bt). Argissolos com horizonte Bt de baixa condutividade hidráulica situados em regiões de alta pluviosidade podem desenvolver “lençol freático suspenso”, facilitando o processo de deslizamento (OLIVEIRA, 2005). Em especial, a variação “vermelho-amarelo” refere-se à cor deste solo, que deve ser vermelho-amarelo, e seu caráter distrófico sugere saturação por bases baixa (IBGE, 2007).

Os espodossolos constituem solos predominantemente arenosos, com concentração de ferro, matéria orgânica ou de ambos em subsuperfície, o que caracteriza o horizonte B espódico. Seu caráter hidromórfico está relacionado com situações de drenagem interna e externa muito limitada, com inundação temporária à superfície e encharcamento quase permanente ou apenas temporário dos níveis superiores do perfil, determinando acumulações de matéria orgânica e fenômenos de redução e reoxidação de compostos de ferro e/ou manganês (OLIVEIRA, 2005).

Os gleissolos são solos característicos de áreas sujeitas a alagamento, como margens de rios, ilhas, grandes planícies, lagoas etc. e, conseqüentemente, com problemas de aeração e drenagem deficiente. Com isso, devido à redução do ferro, apresentam cores acinzentadas ou esverdeadas. A categoria háplico compreende a classe de solos minerais, hidromórficos, pouco desenvolvidos, apresentando horizonte glei (LOPES, 2006).

Os neossolos quartzarênicos compreendem solos arenosos, essencialmente quartzosos, destituídos de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo; são fortemente e excessivamente drenados, muito permeáveis, profundos ou muito profundos. Possuem baixa fertilidade natural, com capacidade de troca de cátions e saturação por bases muito reduzidas (SILVA, 2008).

Figura 2.1: Distribuição dos solos na área.



Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

Os latossolos compreendem solos profundos e muito profundos, em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo e elevadas porosidade e permeabilidade interna, com drenagem excessiva ou muito rápida (RESENDE et al., 2002). Conforme a coloração do horizonte B, são subdivididos em latossolos vermelho-amarelos que são bem drenados, possuem cores vermelho-amareladas, ou latossolos amarelos que são solos de coloração amarelada (IBGE, 2007). A presença de latossolos espessos está associada a herança de períodos mais úmidos, assim como a preservação de vegetação densa (SUGUIO, 2003).

2.3 GEOMORFOLOGIA

A área estudada encontra-se inserida sobre depósitos sedimentares onde o relevo demonstra a predominância dos eventos tectono-estruturais, condicionados pelos tipos litológicos e fatores climáticos sobre os domínios geomorfológicos.

As áreas de exposição da Formação São Sebastião correspondem a uma vasta superfície plana, inclinada suavemente para leste e localmente perturbada com morrotes arredondados e tabuleiros remanescentes da Formação Barreiras. Nas zonas mais preservadas da Formação Barreiras ocorrem extensos tabuleiros mais elevados atingindo cotas de 150 m e cobertos muitas vezes por cangas ferruginosas. Na área de ocorrência do Grupo Ilhas a morfologia é dominada por baixos tabuleiros, com zonas deprimidas de mangues (LIMA, 1999).

Baseados nas características morfogenéticas as unidades que compõem a área de estudo são: regiões de acumulação, mares de morro, formas de dissecação e aplainamento e tabuleiros interioranos (PETROBRAS/UFBA, 2012).

2.4 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia Sedimentar do Recôncavo é a parte sul do *rift* continental abortado, Recôncavo-Tucano-Jatobá, desenvolvido juntamente ao estiramento crustal que resultou na fragmentação do Supercontinente Gondwana durante o Eocretáceo, promovendo a abertura do

Oceano Atlântico. Está situada na região leste do Brasil, no Estado da Bahia e se estende por, aproximadamente, 11.500 km² (SANTOS et al., 1990).

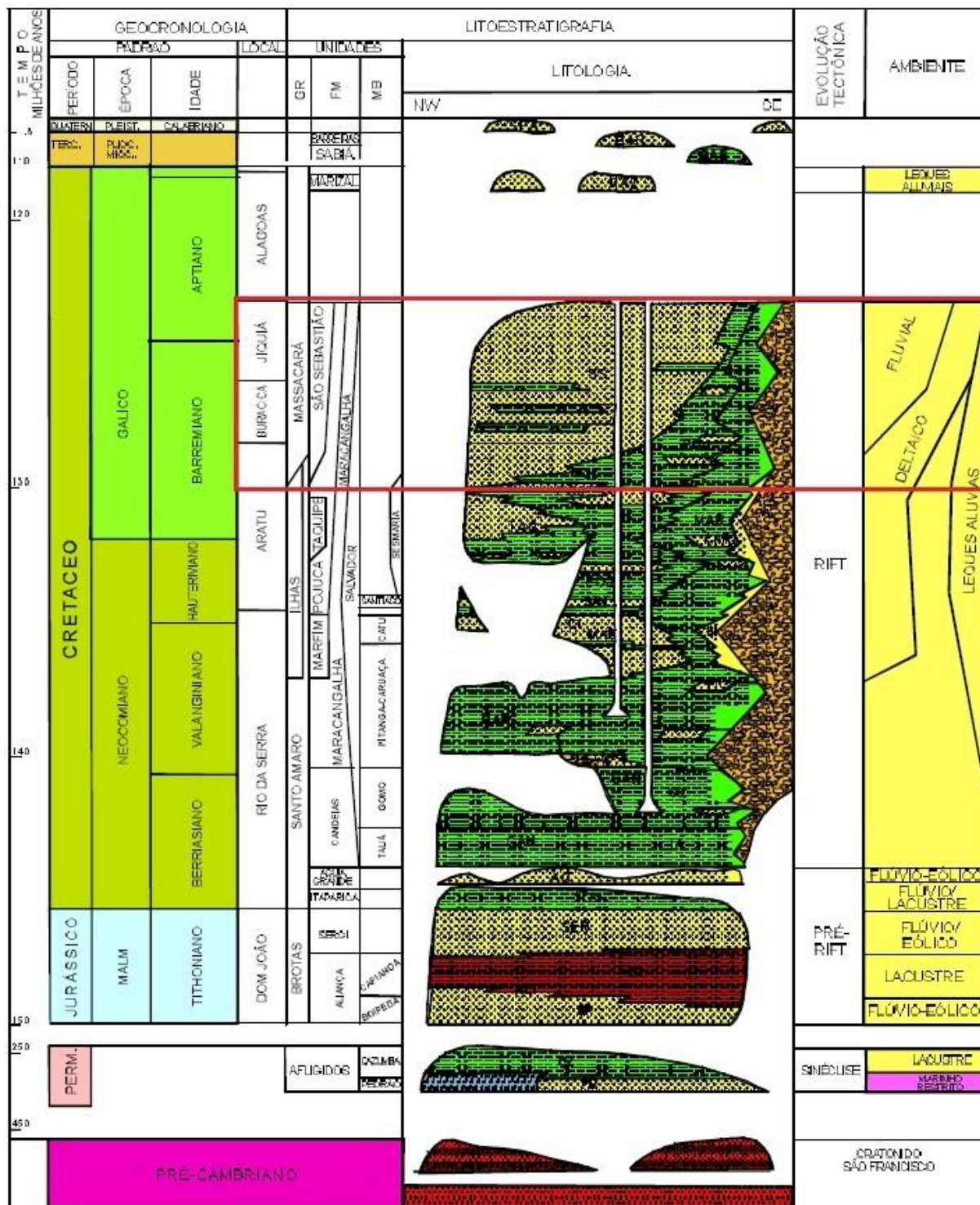
O preenchimento sedimentar da Bacia do Recôncavo (Figura 2.2) compreende os depósitos acumulados durante o processo extensional Juro-Cretáceo e está relacionado aos estágios *pré-rift*, *sin-rift* e *pós-rift*. Sua espessura máxima, superior a 6.500 m, é verificada no Baixo de Camaçari. Na fase *pré-rift*, que engloba três grandes ciclos flúvio-eólicos, depositaram-se sedimentos continentais de origem fluvial do Grupo Brotas (Formações Aliança e Sergi).

A Formação Aliança é composta por arenitos arcoseanos finos a conglomeráticos, e a Formação Sergi é representada por arenitos conglomeráticos vermelhos e marrons com estratificações cruzadas intercaladas por folhelhos vermelhos a cinza-esverdeados.

Ainda neste sistema ocorrem os depósitos flúvio-lacustre da Formação Itaparica composta por folhelhos vermelhos, marrons e cinza-olivas, e siltitos com raras intercalações de arenitos finos e os depósitos flúvio-eólico da Formação Água Grande composto por arenitos fluviais grossos a finos, cinza-claro a esverdeados, com estratificações cruzadas acanaladas de médio a grande porte.

Na fase *sin-rift* (Figura 2.3), a Bacia do Recôncavo foi preenchida por dois sistemas progradacionais principais: o primeiro, flúvio-deltáico passando a lacustre, representado pela Formação Candeias que engloba folhelhos cinza-escuro (Membro Tauá) e arenitos turbidíticos intercalados por folhelhos cinza-esverdeados e calcilutitos (Membro Gomo) característicos de lago profundo, pela Formação Maracangalha que abrange arenitos turbidíticos, finos, maciços, siltíticos a argilosos, ricos em matéria orgânica (Membro Pitanga) e arenitos lenticulares com estratificações plano-paralelas e cruzadas tangenciais (Membro Caruaçu), pelo Grupo Ilhas (Formações Marfim, Pojuca e Taquipe) composto de arenitos cinza-claro, limpos, finos a médios, bem selecionados, intercalados com folhelhos cinza esverdeado da Formação Marfim e arenitos calcíferos muito fino a fino e folhelhos cinzas, siltitos e biocalcarenitos ostracoidais da Formação Pojuca e ainda pelo Grupo Massacará (Formação São Sebastião), cuja sedimentação fluvial finaliza a fase rifte. Esta formação é composta de arenitos de cor e granulometria variados, friáveis, com intercalações de siltitos e folhelhos e ocorre numa área de 7000 km², ocupando 2/3 da Bacia Sedimentar do Recôncavo (MOTA, 2004).

Figura 2.2: Carta estratigráfica.

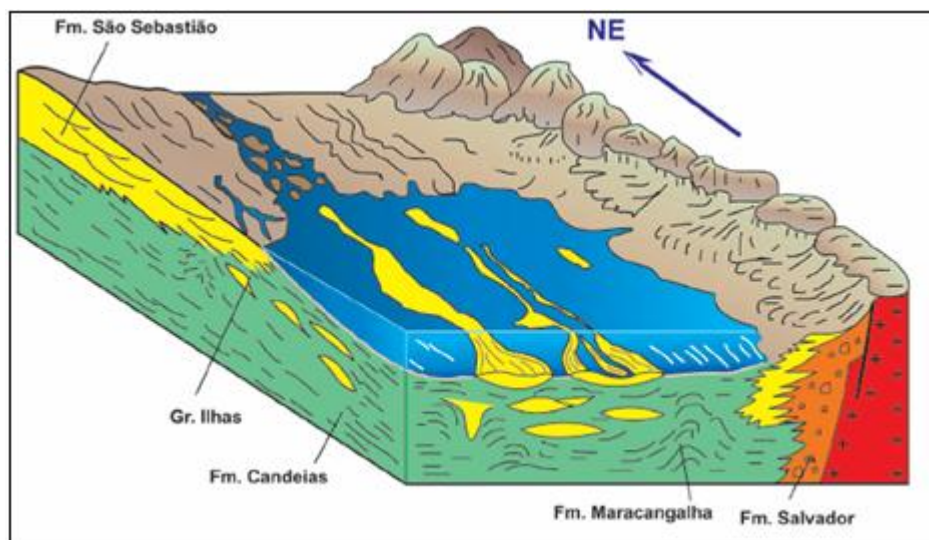


Fonte: Caixeta et al., 1994.

O segundo sistema consiste da Formação Salvador que é composto de fan-deltas derivados da borda falhada, com conglomerados proximais e turbiditos mediais a distais. A sequência *pós-rift* é representada pelos sedimentos de pouca espessura (30 a 50 metros) pertencentes à Formação Marizal. Sua deposição relaciona-se a sistemas de leques aluviais desenvolvidos no contexto de subsidência termal, indicado pela sub-horizontalidade dos estratos, que se sobrepõem discordantemente a seções estruturadas, relacionadas à fase rift. Engloba um pacote de arenitos argilosos, caulíníticos, com finas camadas de siltitos e de folhelhos com presença de níveis conglomeráticos basais.

Os sedimentos inconsolidados que compõem a fisiografia vista atualmente na Bacia do Recôncavo englobam sedimentos de idade Pleistocênico a Holocênico. Os aluviões representam areias mal selecionadas, com níveis cascalhosos contendo seixos angulosos (BARBOSA, 1996).

Figura 2.3: Paleogeografia sin-*rift* da bacia do recôncavo.

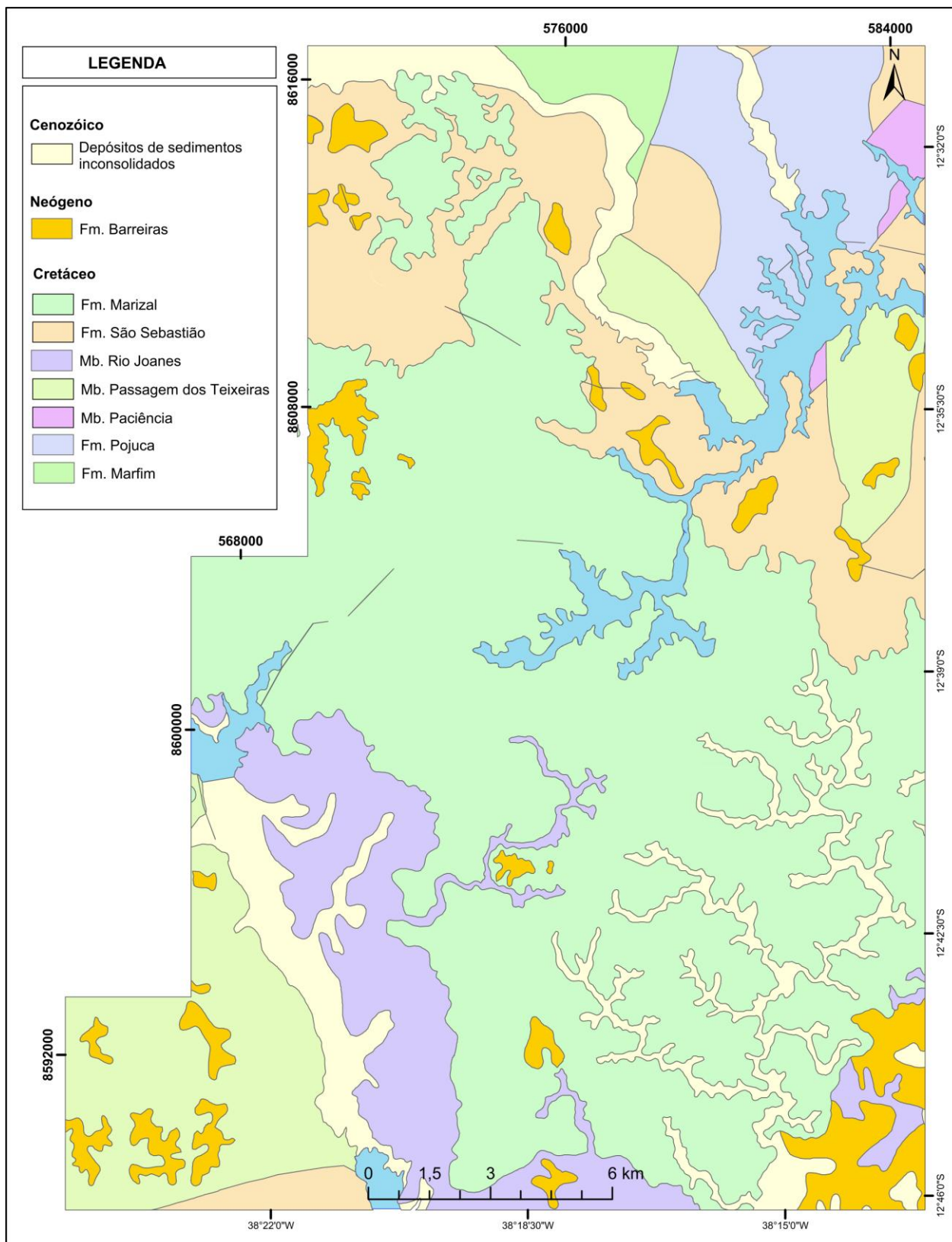


Fonte: Modificado de Medeiros e Pontes, 1981.

2.5 GEOLOGIA LOCAL

A geologia da área de estudo é constituída de Depósitos de Sedimentos Inconsolidados do Quaternário, Formação Barreiras, Formação Sabiá, Formação Marizal, Formação São Sebastião e uma pequena expressão do Grupo Ilhas. Estas unidades são apresentadas no mapa da Figura 2.4 que se encontra na escala 1:150.000.

Figura 2.4: Mapa geológico local.



Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

2.5.1 Depósitos de Sedimentos Inconsolidados do Quaternário

São sedimentos de origem detrítica, aluvionar, flúvio-lagunar e marinhos com distribuição e espessura reduzida que ocorrem com maior frequência nos vales da rede de drenagem, nas planícies de inundação e na faixa litorânea ao longo da área. São constituídos, principalmente, por areia, cascalho e argilas, são mal selecionados e contém ainda, seixos angulosos. Estes sedimentos são ricos em matéria orgânica (BARBOSA, 1996).

2.5.2 Formação Barreiras

Sobrepondo-se discordantemente sobre as rochas da Bacia Sedimentar do Recôncavo e embasamento cristalino ocorrem os depósitos de leques aluviais Terciários da Formação Barreiras que aparecem sob a forma de extensos tabuleiros no Estado da Bahia. Na área em estudo esta Formação tem ocorrência limitada, se apresentando como resíduos localizados, principalmente, a leste e oeste do município de Dias d'Ávila.

Sua base é composta por conglomerado estratificado onde predominam grãos de quartzo leitoso, fragmentos alterados de rochas metamórficas, arenito e seixos de argila. A matriz é arenosa e por vezes ferruginosas. Os arenitos são grosseiros com grãos mal selecionados, subangulares a subarredondados e de cores variadas. A estratificação cruzada domina nos arenitos inferiores. No topo da Formação existe tendência para laminação plano-paralela. Leitões de argilas amarelas ou vermelha, maciços ou com laminação paralela e espessura de até 10 cm, possuem extensão apreciável e cortam discordantemente as camadas inferiores. O truncamento dos leitões é frequente e os diastemas são frequentemente marcados por superfícies limonitizadas. A canga de óxido de ferro é muito comum, impregnando camadas de arenitos (Fotografia 2.1) de mais de um metro de espessura (INDA, 1979).

2.5.3 Formação Marizal

A Formação Marizal ocorre na maior parte da superfície do município de Camaçari sendo representado por relevo ondulado a plano. Com espessura que varia de 30 a 50 metros, está assentado em contato discordante sobre a Formação São Sebastião constituindo-se assim como topo freático favorecendo a recarga natural do sistema aquífero São Sebastião (ALVES, 2012).

Fotografia 2.1: Incrustações ferruginosas na forma de manchas irregulares da Formação Barreiras localizadas ao sul da Cetrel.



Fonte: Fonseca, 2004.

A Formação Marizal é constituída por sedimentos depositados em ambiente de leques aluviais e sistemas fluviais entrelaçados (LIMA, 1991), com grandes variações faciológicas, tanto horizontal quanto vertical é composta, principalmente, por arenitos e conglomerados, mas contém, ainda, siltitos, folhelhos e calcários. Os arenitos têm cores variadas, granulometria fina a grossa, quartzosos, pouco micáceos, contendo grãos de argila branca resultantes da alteração dos feldspatos originalmente presentes (Fotografia 2.2). Apresentam estratificações cruzadas de pequeno a grande porte de baixo ângulo.

Fotografia 2.2: Nível grosseiro da Formação Marizal com presença de argilas brancas.



Fonte: Fonseca, 2004.

A base da formação geralmente é caracterizada pela ocorrência de conglomerados médios a grossos que se apresentam maciços ou estratificados, possuem matriz predominantemente arenosa e podem conter seixos e calhaus de gnaiss, arenito, calcário, quartzo, sílex, siltito, lamito, quartzito e rochas ígneas básicas (BARBOSA, 1996). Os folhelhos são sílticos, pouco calcíferos, às vezes apresentam lâminas de gipsita e barita ou camadas de sílex bandadas. Os siltitos são micáceos, argilosos, raramente ferruginosos e calcíferos. No topo dessa Formação ocorrem fácies lamíticas de argila caulínica clara ou de argilas illíticas avermelhadas ou de cores variadas (CBPM, 2001).

2.5.4 Formação São Sebastião

A Formação São Sebastião, litologicamente, constitui-se de arenitos grossos a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas sílticas. Estratigraficamente sobrepõe-se de forma concordante ao Grupo Ilhas e é recoberto pelas Formações Marizal (Fotografia 2.3) e Barreiras em contatos discordantes (SEABRA, 2011). Sua sedimentação está associada a um regime flúvio-deltáico caracterizado por uma sucessão de espessos corpos de arenitos intercalados com camadas de folhelhos.

Fotografia 2.3: Contato inclinado entre as Formações São Sebastião e Marizal. No detalhe, capa laterítica no contato com gretas de ressecamento.



Fonte: Fonseca, 2004.

O sistema fluvial da Formação São Sebastião é composto por associações de fácies de canal (Fotografia 2.4) e planície de inundação. Morfológicamente, os canais fluviais podem ser classificados como rios entrelaçados que possuem geometria em lençol. A sucessão de fácies do sistema deltaico é, predominantemente, prográdacional, onde ocorre a passagem vertical dos sedimentos finos de pró-delta para os depósitos mais arenosos de frente deltaica distal e proximal (BONGIOLO e SCHERER, 2003).

Fotografia 2.4: Paleocanal da Formação São Sebastião.



Fonte: Fonseca, 2004.

A ausência de feições indicativas do retrabalhamento por onda dos depósitos de frente deltaica, associada à predominância de estruturas geradas por correntes unidirecionais, sugerem que a sucessão deltaica foi construída por progradações fluviais (BONGIOLO e SCHERER, 2003). A espessura total desta Formação, na maior parte do Recôncavo, é superior a 1500 m (CAVALCANTI, 2006). As argilas dessa formação (caulinita e ilita, localmente com altos teores de óxido de ferro) constituem importantes fontes de suprimento para a indústria cerâmica (LIMA, 1999).

Na área estudada a Formação São Sebastião foi, estratigraficamente, compartimentada em três membros: Rio Joanes, Passagem dos Teixeiras e Paciência.

2.5.5.1 Membro Rio Joanes

Membro superior constituído de arenitos amarelos, róseos, cinza-avermelhado, vermelho brilhante, mal selecionados, texturalmente imaturos. Os corpos são espessos, maciços ou com estratificação cruzada, separados por inúmeros diastemas marcados por superfície limonitizadas (BRASIL, 1981). Nesta sequência ocorrem intercalações de argilas silticas, folhelhos, siltitos e arenitos pobremente fossilífero (BARBOSA, 1996). O contato inferior com o Membro Passagem dos Teixeiras é gradacional, enquanto o contato superior é discordante com a Formação Marizal, com a Formação Barreiras e com os aluviões recentes (BAHIA, 1992).

2.5.5.2 Membro Passagem dos Teixeiras

Membro médio, composto por espessas sucessões de arenitos quartzosos, cinza, amarelos e rosados, siltitos e folhelhos vermelhos e verde-cobre contendo lâminas e cristais de barita empilhados em bancos espessos com estratificação cruzada (LIMA, 1999). Os arenitos apresentam-se também interestratificados com folhelhos e siltitos verde ou cinza, com calcários nodulares impuros (BRASIL, 1981).

2.5.5.3 Membro Paciência

Membro inferior representado, em sua base, por um espesso pacote arenoso esbranquiçado, de granulação fina a grossa e de matriz caulínica. A parte superior é constituída por intercalações de folhelhos e siltitos calcíferos com nódulos de sílex e de calcário. Inclui uma camada composta por folhelhos pretos abundantemente fossilífero carbonosos, contendo lentes de calcário oolítico, abundante em fósseis de ostracóides, gastrópodos, lamelibrânquios e restos de vertebrados (LIMA, 1999).

2.5.6 Grupo Ilhas

É representado na área por intercalações de espessos folhelhos e siltitos, contendo diversos corpos de arenitos e delgados calcários. Os folhelhos são cinza-esverdeados, castanhos e negros, micáceos, muito calcíferos e fossilíferos. Os siltitos são cinza-claros, argilosos e bem laminados em estratos paralelos. Os arenitos são de granulação fina raramente grosseiros e com

abundante matriz argilosa, apresentando ainda marcas de onda e estruturas de escorregamento. Ocasionalmente, podem ocorrer finos níveis conglomeráticos contendo seixos de gnaisses e granulitos numa matriz areno-argilosa. As argilas do grupo incluem misturas de illita e montmorilonita, com predominância dessa última. Sua espessura total pode alcançar mais de 2.000 m nos níveis mais profundos da bacia (GHIGNONE, 1979; MILANI, 1987).

2.6 ZONEAMENTO DE LITOFÁCIES DA FORMAÇÃO SÃO SEBASTIÃO

Lima (1999) propôs um zoneamento de litofácies para seção aquífera explorada da Formação São Sebastião da área de Camaçari e Dias D'Ávila baseado nos estudos de perfis geofísicos de poços, descrições de amostras de calha e testemunhos. A Figura 2.5 representa este zoneamento, com exceção da Sequência Argilosa Basal e do Fácies Arenosa PT1.

Segundo este zoneamento que inclui os membros médio e superior da Formação São Sebastião existe um limite entre estes caracterizado por uma sequência argilosa de extensão regional denominada Sequência Argilosa Superior (SAS) que possui espessura entre 80 e 120 metros.

De acordo com Lima (1999) o Membro Passagem dos Teixeiras contém sete litofácies e o Membro Rio Joanes é composto por cinco litofácies que foram caracterizadas, em ordem estratigráfica ascendente, da seguinte maneira:

- **Sequência Argilosa Basal (SAB)** – Representa o topo do Membro Paciência e consiste de uma sucessão de folhelhos pretos e cinza-esverdeados, calcíferos, carbonosos e fossilíferos, ricos em coprólitos e ostracóides, intercalados com siltitos microlaminados, calcíferos e micáceos, e com calcários creme-acastanhados com siltitos microlaminados, perfazendo uma espessura de 120-180 m. Abaixo dessa sequência desenvolve-se um pacote de arenitos esbranquiçados, friáveis, de granulação média a fina e regularmente classificados, referido como arenito Bebedouro pelos geólogos da Petrobrás (MOSMANN e TONIATTI, 1968);

- **Fácies Arenosa PT1** – A base do Membro Passagem dos Teixeiras corresponde a um espesso pacote composto principalmente de arenitos cinza-claros a cinza-esverdeados, friáveis de granulação média a fina, mas, por vezes, grosseira, regularmente a mal selecionados,

com até 400 m de espessura. Este pacote compõe-se de corpos individuais de areias em estratos cruzados, com espessuras que variam de 5 a 25 m e que representa o empilhamento de sucessivos ciclos deposicionais. Em geral, esses corpos apresentam em perfis, feições indicativas de contatos basais erosionais e uma granodecrescência ascendente nas colunas dos poços. No topo, transicionam a folhelhos cinza a castanho-avermelhados, micáceos e parcialmente carbonosos, através de intercalações de lâminas milimétricas a centimétricas, de siltitos ou arenitos finos e de argilitos. As zonas de transição e os folhelhos capeadores dessas areias podem variar de menos de 5 a mais de 20 m de espessura.

- **Sequência Argilosa Inferior (SAI)** – Sequência predominantemente argilosa de confinamento dos arenitos PT1. Compreende um pacote litológico com cerca de 80-100 m de espessura, do qual mais de 70% são argilitos ricos em microfósseis. Espessas camadas de folhelhos cinza-esverdeados a cinza escuros e, às vezes, marrom-avermelhados, ora laminados, ora maciços, algo micáceos e carbonosos, contém finos estratos de arenitos argilosos e gradações para siltitos argilosos amarelo-esbranquiçados. Ocupando posições variadas na seção, ocorrem bancos areno-argilosos de granulação fina e com estratificação cruzada de pequeno porte e laminações convolutas, que chegam a alcançar espessuras superiores a 20 m.

- **Fácies Arenosa PT2** – Compõe-se, essencialmente, de arenitos cinza-esbranquiçados a cinza-rosados, de granulação média a fina, regularmente selecionados, em bancos cíclicos sobrepostos e demarcados por folhelhos ou transições rítmicas de argilitos e siltitos. Os bancos arenosos podem variar de 5 a 20 m de espessura, e apresentam nitidamente, feições erosionais e granulometria mais grosseira na base, com diminuição granulométrica e aumento de selecionamento e argilosidade, em direção ao topo. Estratificação cruzada planar de médio porte e estratificação paralela são comuns. Os folhelhos são cinza-esverdeados, verdes ou cinza-acastanhados, micro-micáceos e carbonosos. Compõem uma espessura total que pode alcançar 130 m.

- **Sequência Argilosa Média (SAM)** – Sucessão de folhelhos castanhos a cinza-esverdeados, por vezes preto-esverdeados, micro-micáceos, calcíferos e piritosos. Apresentam-se bandeados, com bandas claras mais siltosas e calcíferas e bandas escuras ricas em matéria orgânica. São ricos em fósseis de peixes, pelecípodos, gasterópodos, estherias e ostracóides. Incluem lentes e camadas decimétricas de calcário argiloso microcristalino, e gradações para folhelhos vermelho-acinzentados com nódulos e concreções limoníticas. Intercalações métricas

de siltitos laminados, cinza-azulados, micáceos e cloritosos e de arenitos de granulação fina e cimento calcífero são comuns. Internamente, ocorrem arenitos castanho-claros a róseos, que podem alcançar até 20 m de espessura. Esses arenitos são médios a grosseiros e mal selecionados na base, e gradam ascendentemente para arenitos finos, argilosos e intercalações irregulares de arenitos, siltitos e argilitos.

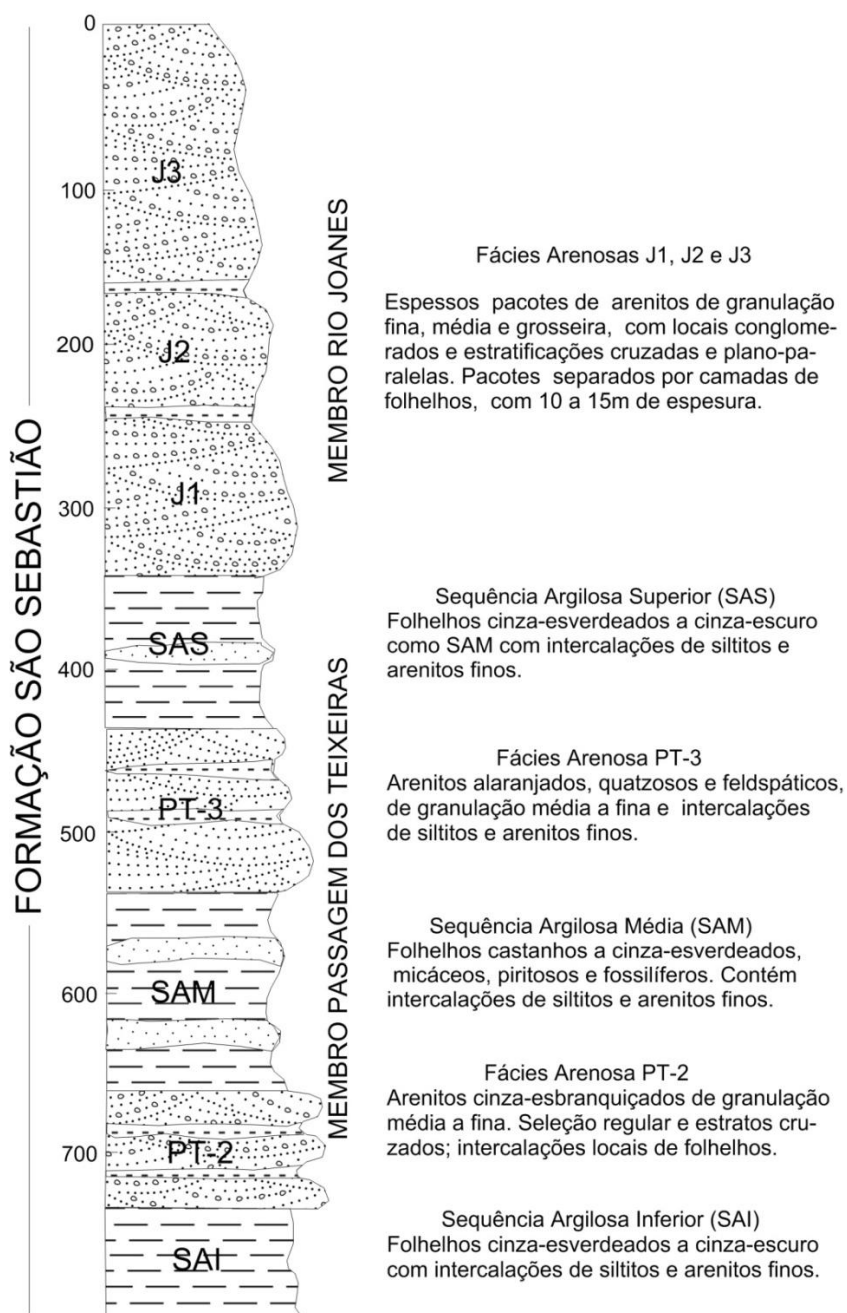
- **Fácies Arenosa PT3** – Lençóis superpostos de arenitos alaranjados e castanho-avermelhados, feldspáticos, micáceos e ferruginosos, formam um pacote de até 130 m de espessura. No terço inferior, os arenitos possuem granulação média a fina, são bem selecionados, e possuem estratificações cruzadas planares de mergulhos altos. Podem incluir corpos lenticulares de arenitos mais grosseiros e folhelhos castanho-avermelhados. Tipicamente, os lençóis nos 100 m superiores se iniciam com arenitos feldspáticos de granulação média a grosseira, em estratos cruzados ou sub-horizontais e convolutos. Em alguns locais contém, normalmente, níveis de seixos e grânulos de quartzo, de granitos e de folhelhos; gradam para arenitos caulínicos, média a finamente granulados e, finalmente, se tornam finos e argilosos na zona transicional superior. Em vários trechos ocorrem folhelhos castanho-avermelhados e zonas de interestratificações de folhelhos e arenitos finos, argilosos e micáceos.

- **Sequência Argilosa Superior (SAS)** - Na base predominam folhelhos cinza-esverdeados escuros a cinza-acastanhados, duros e quebradiços, algo micáceos e com muita pirita disseminada. São ricos em fósseis de ostracóides, restos de peixes e conchas de pelecípodos. Na parte superior, os folhelhos se tornam castanho-amarelados, castanho-avermelhados e arroxeados e possuem intercalações de siltitos (cinza-esverdeados, argilosos e friáveis, com finos estratos cruzados, com bandas cloritosas e matéria orgânica dispersa e bandas claras mais calcíferas) e arenitos (cinza-esverdeados e amarelo-alaranjados, de granulação fina, caulínicos e micáceos, e com estratificação plano-paralela). Existem pelo menos dois corpos de arenitos, de 15 a 30 metros de espessura, inclusos nesta sequência.

- **Fácies Arenosa J1** - A parte basal do Membro Rio Joanes é composta de uma sucessão vertical de bancos arenosos caracterizados por erosão basal e acamadamento gradacional em direção ao topo. Os arenitos são laranja-avermelhados a castanho-avermelhados conglomeráticos com seixos de quartzo e de folhelhos. Contém estratos cruzados na parte da base e passam a arenitos friáveis, maciços, de granulação média a fina, com níveis esparsos de

grânulos, seixos quartzosos e pelotas de argilas; tornam-se finamente granulados no topo, argilosos e micáceos, e com estratificação cruzada tabular; finalmente, são recobertos por folhelhos castanho-avermelhados, bandados com siltitos e arenitos finos, na zona de transição. Os folhelhos, pobres em fósseis, podem conter diques centimétricos de arenitos finos, níveis limoníticos e nódulos de manganês.

Figura 2.5: Zoneamento litológico da Formação São Sebastião composta pelos Membros Rio Joanes e Passagem dos Teixeiras da Formação São Sebastião na região de Camaçari-DiasD'Ávila.



Fonte:PETROBRÁS/UFBA, 2012.

- **Fácies Argilosa J1** - Folhelhos castanho-avermelhados, duros, com intercalações de siltitos e arenitos finos argilosos. Sua espessura pode atingir de 15 a 20 m.

- **Fácies Arenosa J2** - Lençóis empilhados de arenitos rosa a cinza-amarelados, de granulometria média a fina, mas localmente conglomeráticos, separados por intercalações métricas de folhelhos e siltitos micáceos. Acumulam uma espessura da ordem de 200 m e mostram padrões elétricos similares aos de J1.

- **Fácies Argilosa JM** - Folhelhos castanho-amarelados e cinza-esverdeados, maciços, bandeados ou com fissilidade irregular, com intercalações de siltitos e arenitos finos argilosos, como acima. Incluem diques centimétricos de siltitos arenosos. Espessura em torno de 15 m. J1 e JM possuem características elétricas diagnósticas que permitem utilizá-los em estudos de correlação litoestratigráfica, mas, provavelmente, não são de extensões regionais.

- **Fácies Arenosa J3** - Arenitos cinza, rosa e alaranjados, friáveis, de granulação fina a média, em estratos cruzados acanalados e tabulares de ângulos altos. Níveis esparsos de materiais mais grosseiros com seixos e grânulos acentuam essa estratificação. Intercalam-se níveis de folhelhos castanho-avermelhados, fósseis, siltosos e micáceos, de até 5 m de espessura, como em J2. A espessura composta pode alcançar até 250 m.

2.7 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

A Formação São Sebastião constitui um expressivo sistema hidrogeológico que reúne litologias e estruturas favoráveis à acumulação de abundantes recursos hídricos subterrâneos. A disposição de suas camadas alterna níveis mais e menos permeáveis que configuram aquíferos em condições livre e semi-confinadas. O componente livre é um reservatório de armazenamento limitado, mas, de grande importância, pois tende a controlar substancialmente a recarga do sistema semi-confinado. A porção livre é representada pelo membro superior da Formação São Sebastião (o Membro Rio Joanes). A porção semi-confinada é composta pelo Membro Passagem dos Teixeiras e Paciência (membros médio e inferior, respectivamente) (LIMA, 1999).

A principal fonte de recarga das águas subterrâneas do aquífero da Formação São Sebastião é atribuída às precipitações que ocorrem sobre suas zonas de afloramento. Acredita-se que essas recargas também possam ser decorrentes dos aluviões nos períodos mais chuvosos, quando os principais cursos de água têm seus níveis elevados, bem como, indiretamente, por infiltrações verticais de aquíferos estratigraficamente superiores (Formações Marizal e Barreiras) (IBGE,1999).

O aquífero São Sebastião é constituído predominantemente por camadas arenosas com intercalações de argilas. Sua espessura que chega a atingir 3.000 m (COSTA, 1994), apresenta elevado potencial hidrogeológico com vazões que podem atingir valores superiores a 100 m³/h, às vezes ultrapassando os 300 m³/h para poços tubulares com profundidades entre 150 e 380 m podendo apresentar água doce até 1000 m de profundidade (LEITE, 1964).

O volume de água doce armazenado nesse aquífero pode ser estimado multiplicando sua área exposta pela espessura da zona de água doce, pela proporção de areia presente e pela porosidade média da formação, resultando em $6,0 \times 10^{11}$ m³ de água. A reserva anual explorável, dada pelo produto da área exposta da formação com a altura anual de chuvas e com a taxa efetiva de infiltração, é estimada em 5×10^8 m³/ano (LIMA, 1999). Um resumo dos parâmetros hidrogeológicos dos poços na área de estudo é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros hidrogeológicos médios de poços do aquífero São Sebastião.

	Camaçari	Dias d'Ávila	Mata de São João	Simões Filho
Número de poços	195	21	29	67
Nível estático (m)	12,7 ± 2,2	10,2 ± 5,0	10,2 ± 5,3	5,8 ± 2,0
Nível dinâmico (m)	40,5 ± 4,5	36,8 ± 9,0	36,8 ± 9,1	49,3 ± 4,2
Vazão específica (m³/h/m)	2,9 ± 1,1	2,9 ± 3,0	2,9 ± 2,6	0,3 ± 0,2
Profundidade (m)	126,1 ± 16,0	206,9 ± 144,0	206,9 ± 143,7	190,2 ± 90,5

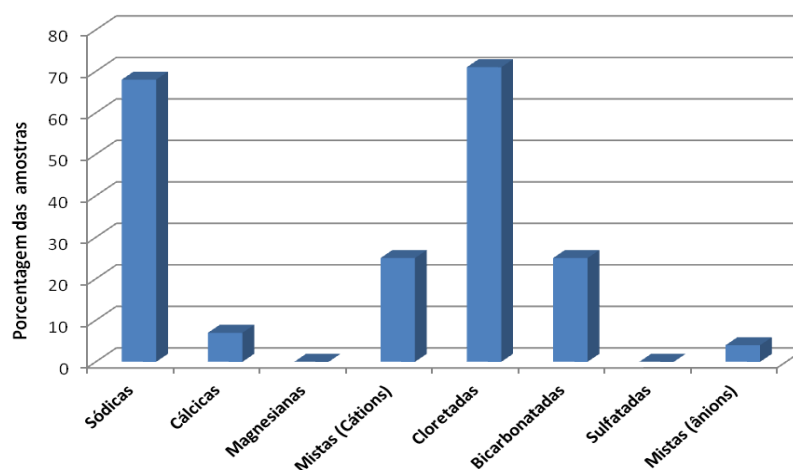
Fonte: Adaptado de Siagas, 2015.

Quimicamente, a qualidade das águas do São Sebastião é considerada boa. Costa (1994) informa que os valores de sólidos totais dissolvidos são frequentemente menores do que 500 mg/L. A Figura 2.6 apresenta a frequência dos tipos químicos das águas.

A utilização da água para irrigação é restrita a pequenas áreas e com utilização de baixos volumes. Nas áreas industriais onde o aquífero é densamente explorado os níveis piezométricos podem estar apresentando cones de rebaixamento (RIBEIRO, 2013).

Do ponto de vista hidráulico, o sistema aquífero São Sebastião constitui-se num meio extremamente heterogêneo. O escoamento subterrâneo do aquífero freático mais superficial é controlado pela topografia do terreno, com as áreas de recarga situadas junto aos altos topográficos e as de descargas junto aos córregos, rios, drenos e áreas alagadas (SILVEIRA JÚNIOR, 2004).

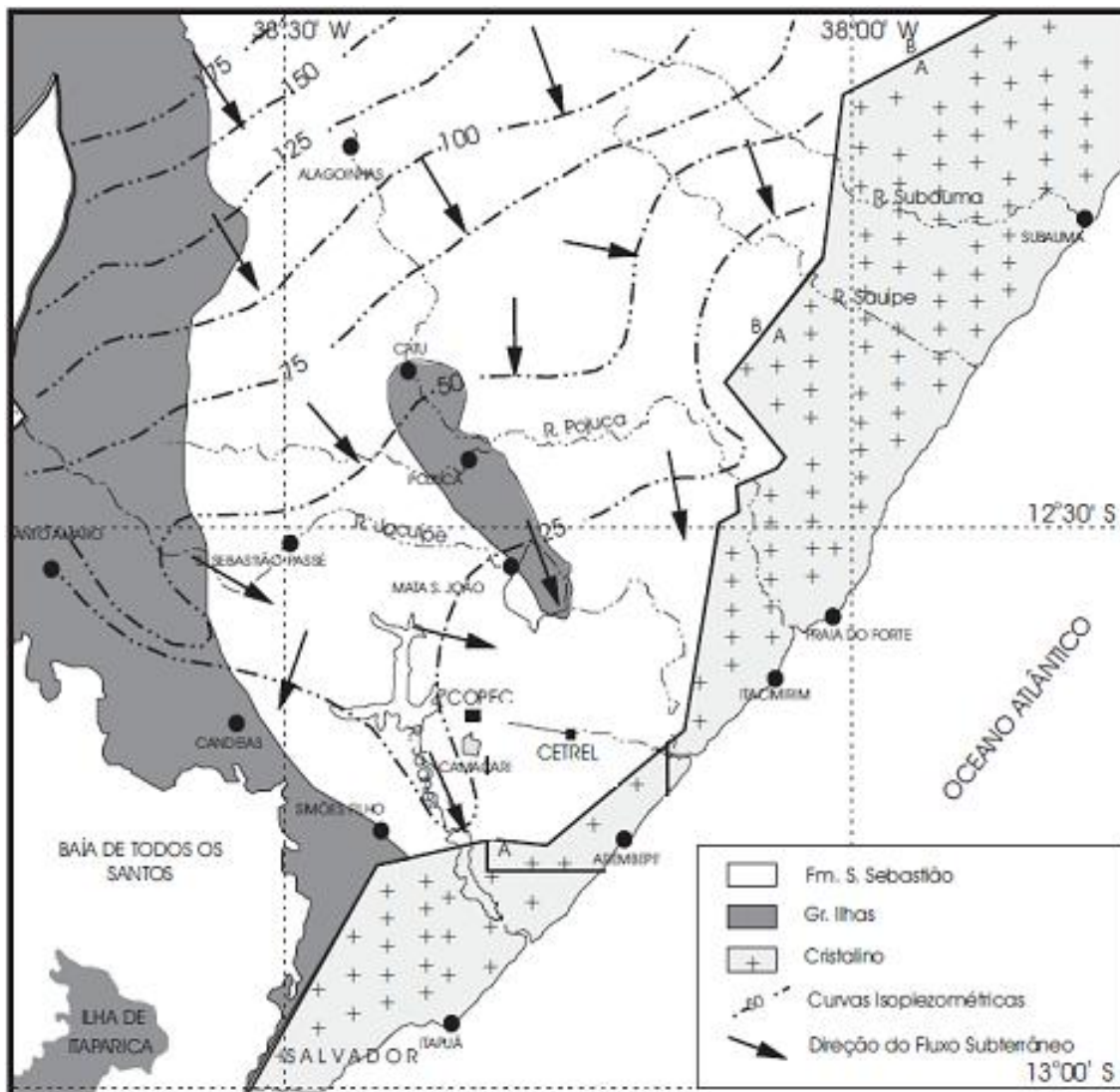
Figura 2.6: Frequência dos tipos de águas.



Fonte: Autora.

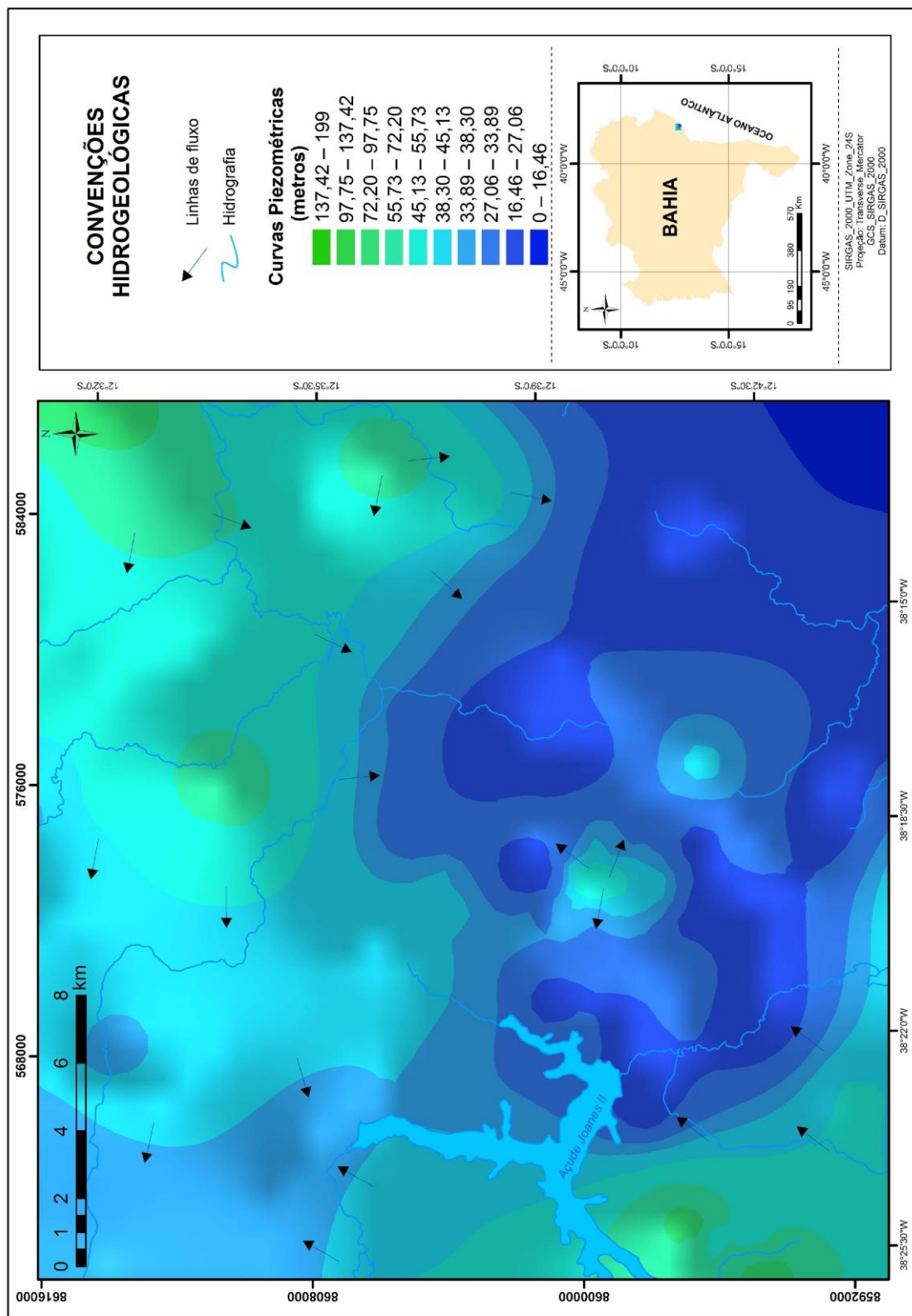
Desta forma, observa-se que o comportamento do fluxo de águas do aquífero livre tende a sofrer variações de acordo com a escala em que é observada. Numa visão regional da área a direção do fluxo subterrâneo é de W-NW para E-SE (Figura 2.7) de acordo com o mergulho regional dos estratos (LIMA, 1999). Localmente, a direção do fluxo converge para alimentar as correntes de água superficial (Figura 2.8). Há um paralelo muito forte entre as linhas do fluxo subterrâneo e aquelas do fluxo superficial (CAVALCANTI, 2006).

Figura 2.7: Mapa potenciométrico regional do sistema aquífero Recôncavo Norte.



Fonte: Modificado de Leite (1964).

Figura 2.8: Mapa potenciométrico local.



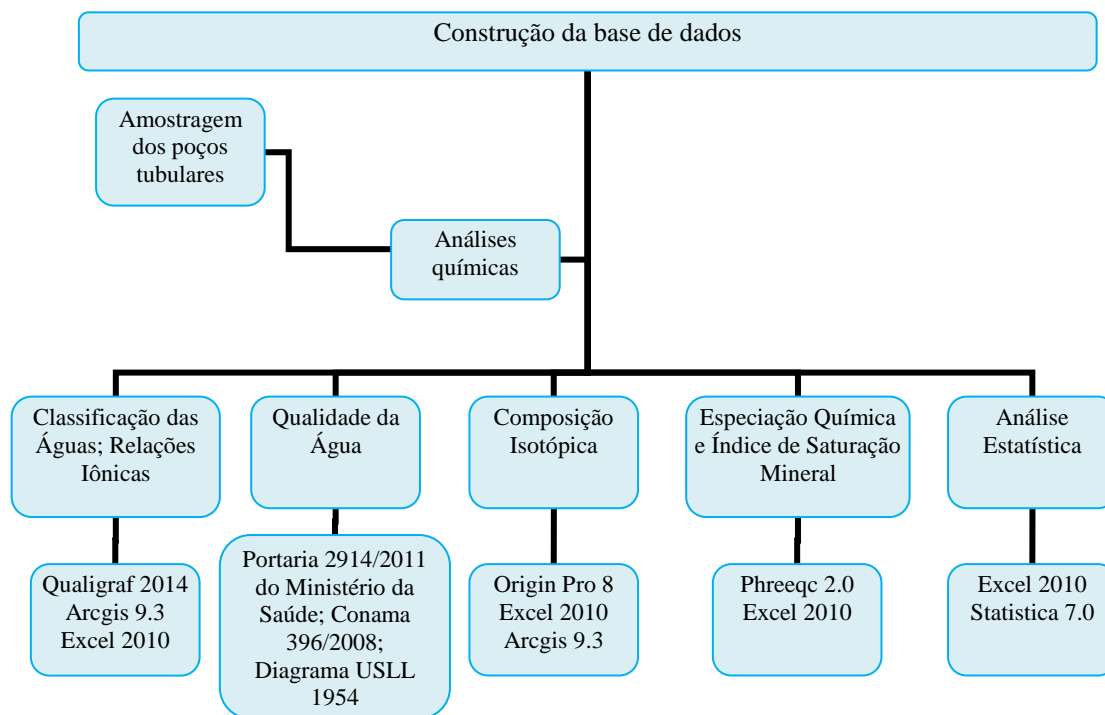
Fonte: A autora, 2015.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para chegar ao objetivo proposto foram realizadas seqüências de atividades integradas que se encontram resumidas na Figura 3.1.

Figura 3.1: Fluxograma representativo das principais etapas da pesquisa.



O projeto de pesquisa iniciou com a revisão teórica através de artigos, trabalhos acadêmicos e livros. Para desenvolver a caracterização hidroquímica das águas foram selecionados 17 poços da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA). A amostragem foi realizada nos meses de agosto e setembro de 2014. Além desses, foram utilizados 11 poços cadastrados no banco de dados do SIAGAS/CPRM que continham dados de análises físico-químicas e perfil litológico do poço.

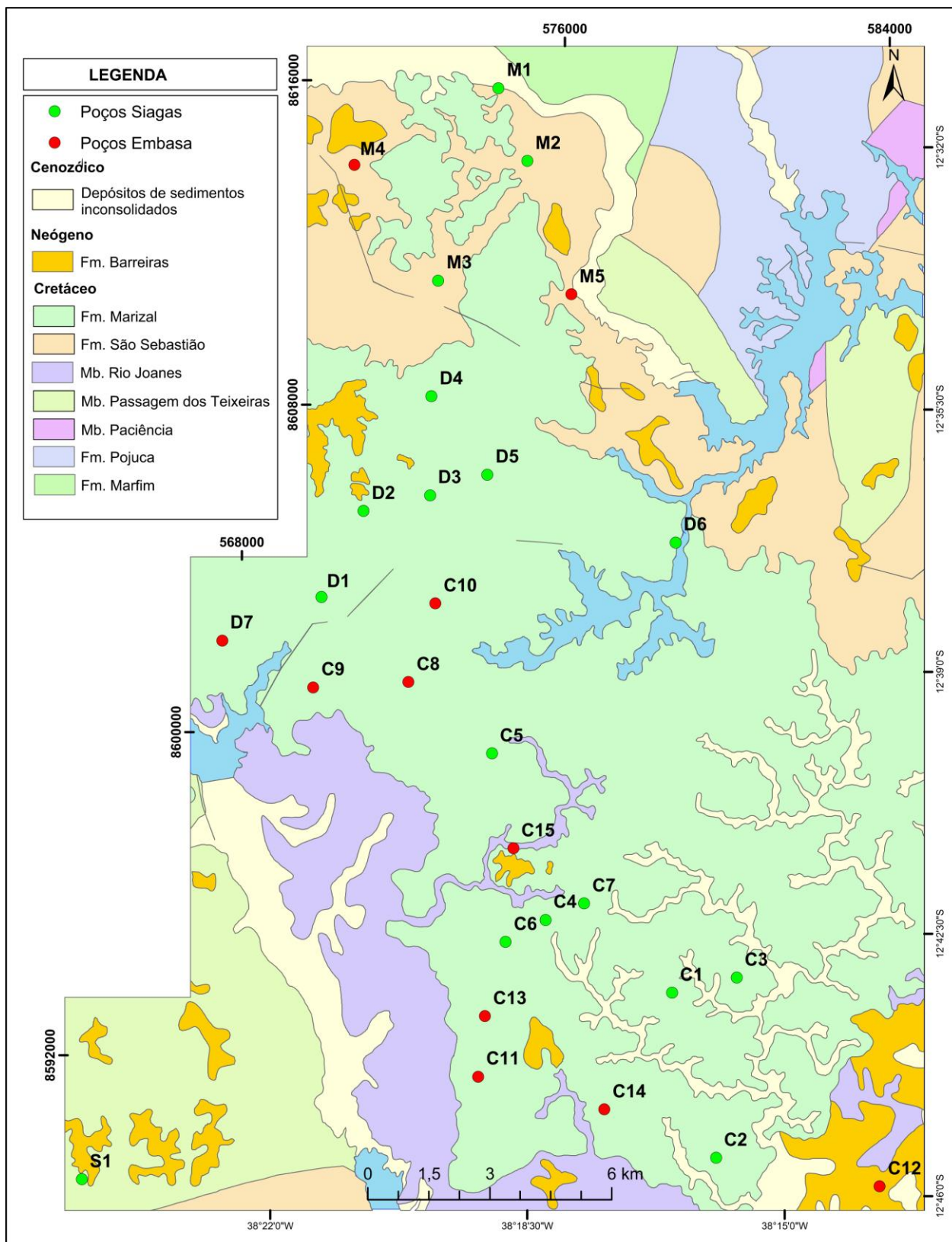
Na Tabela 3.1 são apresentados os poços utilizados, suas coordenadas e respectivos municípios. A nomenclatura da amostra corresponde a letra inicial do município seguido de numeração cardinal crescente. Na Figura 3.2 encontram-se a localização dos poços estudados.

Tabela 3.1: Poços utilizados na pesquisa

Coordenadas UTM		Amostra	Município
X	Y		
578634	8593542	C1	Camaçari
579718	8589478	C2	Camaçari
580226	8593914	C3	Camaçari
575518	8595337	C4	Camaçari
574198	8599435	C5	Camaçari
574536	8594795	C6	Camaçari
576467	8595743	C7	Camaçari
572140	8601189	C8	Camaçari
569795	8601060	C9	Camaçari
572809	8603126	C10	Camaçari
573859	8591476	C11	Camaçari
583748	8588777	C12	Camaçari
574028	8592966	C13	Camaçari
576968	8590670	C14	Camaçari
574724	8597097	C15	Camaçari
569998	8603282	D1	Dias d' Ávila
571040	8605399	D2	Dias d' Ávila
572674	8605788	D3	Dias d' Ávila
572707	8608226	D4	Dias d' Ávila
574089	8606295	D5	Dias d' Ávila
578721	8604626	D6	Dias d' Ávila
567557	8602214	D7	Dias d' Ávila
574361	8615808	M1	Mata de São João
575071	8614014	M2	Mata de São João
572877	8611071	M3	Mata de São João
570811	8613916	M4	Mata de São João
576150	8610733	M5	Mata de São João
564100	8588950	S1	Simões Filho

Para o armazenamento das 17 amostras coletadas no campo foram utilizados frascos plásticos de polietileno (1L) acidificados com ácido nítrico para determinação dos metais (Al^{3+} , Cr^{4+} , Mn^{2+} , Si^{3+} , Zn^{2+} , Fe_{total} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+}), frascos plásticos de polietileno (1L) sem reagentes para determinação de CO_3^{2-} , HCO_3^- , alcalinidade e SO_4^{2-} , e frascos de vidro (100 mL) na cor âmbar para análises das razões isotópicas de D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Figura 3.2: Localização dos poços estudados.



Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

As medições dos parâmetros físico-químicos (pH, Eh, condutividade elétrica, turbidez, temperatura, oxigênio dissolvido, densidade específica) foram realizadas *in situ* utilizando a sonda multiparamétrica Horiba modelo U-50 (Fotografias 3.1 e 3.2).

Fotografia 3.1: Poço tubular amostrado.



Fotografia 3.2: Multiparâmetro e frasco utilizado para armazenamento da amostra.



As análises químicas, realizadas no Laboratório de Plasma do Instituto de Geociências da UFBA (Cl^- e SO_4^{2-}) e no Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO) do Núcleo de Estudos Ambientais da UFBA (NEA) (Al^{3+} , Cr^{4+} , Mn^{2+} , Si^{4+} , Zn^{2+} , Fe_{total} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , alcalinidade), foram baseadas nos manuais *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995), e na espectrometria de emissão ótica (ICP-OES).

As análises químicas de cloreto (Fotografia 3.3) foram realizadas através do método de padronização de Mohr que baseia-se em titular o nitrato de prata com solução padrão de cloreto de sódio (padrão primário), usando solução de cromato de potássio como indicador.

O CO_3^{2-} e HCO_3^- foram determinados através da alcalinidade. O método baseia-se na determinação titrimétrica das várias formas de alcalinidade mediante o uso de um ácido forte (ácido sulfúrico) mineral até o ponto de equivalência do bicarbonato e do ácido carbônico, usando indicadores apropriados (Fotografia 3.4).

E a análise de sulfato foi efetuada através do método *SulfaVer4* que consiste em adicionar o reagente *Sulfate Reagent Powser Pillow* a cubeta com amostra (Fotografia 3.5), agitar até que ocorra a dissolução e inseri-la no espectrofotômetro molecular modelo U5100 Hitachi (Fotografia 3.6) para que seja realizada a leitura das concentrações.

Fotografia 3.3: Ensaio analítico para determinação do cloreto.



Fotografia 3.4: Ensaio analítico para determinação de alcalinidade.



Fotografia 3.5: Reagente e cubetas utilizados na análise de sulfatos.



Fotografia 3.6: Espectrofotômetro molecular U5100 Hitachi.



As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) – UFBA de acordo com os métodos: Razão D/H e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ CRDS (cavidade ressonante tipo *ring-down*), Razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do carbono inorgânico dissolvido – DIC (CRAIG, 1957).

Para a realização das análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e δD foi utilizado o espectrômetro de massas da *PICARRO* modelo L2120-i (Fotografia 3.7). A CRDS é uma técnica espectroscópica de absorção direta de alta sensibilidade baseada na determinação de uma constante de tempo do decaimento exponencial da luz que sai da cavidade óptica (BERDEN e ENGELN, 2009). O espectrômetro de massa de razão isotópica é um equipamento que ioniza as moléculas gasosas e separam os íons em um espectro de acordo com a razão massa/carga usando campos magnéticos e elétricos. Depois das sequências de limpeza da cavidade, evacuação e

preenchimento com o gás N_2 a 99,999% de pureza, alíquotas de água de, aproximadamente, $2\mu l$ são injetadas em um vaporizador mantido a $110^\circ C$. No vaporizador, o vapor de água se mistura com o N_2 formando uma mistura homogênea, por um tempo de 90s, que é enviada ao analisador a um fluxo constante de 30ml/min. Na cavidade óptica, uma varredura sobre as linhas espectrais selecionadas é realizada para quantificar as características espectrais dos quatro isótopos de interesse (SANTOS, 2013).

Para a realização das análises isotópicas de $\delta^{13}C_{DIC}$ foi utilizado Espectrômetro *Finningan GasBench* (Fotografia 3.8).

Fotografia 3.7: Espectrômetro de massas de razão isotópica.



Fonte: www.PICARRO.com

Fotografia 3.8: *Finningan GasBench*.



Para a preparação das amostras foram inseridos $30\mu l$ de ácido fosfórico em um *vial* (Fotografia 3.9), em seguida foi retirado o ar do *vial* injetando hélio. Posteriormente, insere-se $0,7$ ml de amostra neste *vial*. Após um tempo de equilíbrio de aproximadamente 18 horas as amostras são analisadas (Fotografia 3.10) utilizando-se um sistema cromatográfico composto por uma coluna de adsorção, onde ocorre a separação dos componentes gasosos, permitindo que o CO_2 seja introduzido no espectrômetro de massas onde os valores de $^{13}C_{DIC}$ são obtidos em relação à um padrão de referência. Os padrões utilizados foram o PB3 (água mineral comercial do Estado da Bahia) e PB4 (água mineral comercial proveniente da região dos Alpes).

Fotografia 3.9: Vial, ácido e seringa utilizados na preparação de amostras para análise de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



Fotografia 3.10: Amostras preparadas inseridas no *Finningan GasBench*.



A classificação das águas foi realizada no software Qualigraf (FUNCEME, 2014) utilizando o diagrama Triangular de Piper (1944) e os sólidos totais dissolvidos (STD). As relações iônicas características foram desenvolvidas a partir da análise do diagrama de Piper.

Para estabelecer a qualidade das águas foi utilizada a Portaria n° 2914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011 e a Resolução Conama n° 396 de 3 de abril de 2008 que dispõe sobre a qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. O diagrama de Lemoine (1954) foi utilizado para determinar a qualidade das águas para a irrigação e o quadro de Mathess (1982), Szikszay (1993) e Driscoll (1986) foi utilizado para identificar a qualidade das águas para a indústria.

No intuito de auxiliar as análises dos resultados foram confeccionadas planilhas no Excel 2010 e no Statistica 7.0 onde os dados foram processados obtendo-se o sumário estatístico, a correlação de Spearman e a análise da variância (ANOVA) complementada pelo método de Tukey.

Com o Phrreq 2.0 (PARKHURST e APELLO, 1999) determinou-se os índices de saturação, a fase mineral e a especiação química dos elementos. Na avaliação dos dados isotópicos foi utilizado o software Origin Pro 8 para confecção dos gráficos. O software Arcgis 9.3 foi utilizado para confeccionar os mapas de distribuição geoquímica e isotópica, geológico e pedológico.

CAPÍTULO 4

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS

Para realizar a classificação das águas subterrâneas foram utilizados dados extraídos de 28 poços tubulares instalados na Formação São Sebastião em diferentes profundidades.

Com os dados de análises químicas e com o auxílio do *software* Qualigraf (FUNCEME, 2014) foi possível realizar a classificação utilizando o Diagrama Triangular de Piper (1944) e a classificação em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos.

4.1 DIAGRAMA TRIANGULAR DE PIPER

Através do Diagrama Triangular de Piper (1944), que caracteriza as águas com relação aos íons dominantes e, frequentemente, é utilizado para comparar os distintos grupos de água, estabeleceu-se a classificação das águas subterrâneas conforme apresentado na Figura 4.1. Esta classificação é baseada em oito íons (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- e SO_4^{2-}) em miliequivalentes por litro (meq/L) que leva em consideração não apenas a concentração do soluto iônico em peso, mas também, a equivalência química (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

Os valores analíticos dos elementos maiores obtidos permitiram identificar os tipos principais de águas na região: águas cloretadas sódicas (53% das amostras), águas bicarbonatadas sódicas (14% das amostras), águas cloretadas mistas (14% das amostras). Subordinadamente, ocorrem águas bicarbonatadas mistas (7% das amostras), águas cloretadas cálcicas (4% das amostras), bicarbonatadas cálcicas (4% das amostras) e mistas (4% das amostras).

O grupo classificado como cloretadas sódicas concentram pouco mais da metade das amostras (53%). O cloreto ocorre numa proporção média de 71% e o bicarbonato, secundariamente, ocorre com 35% da média do grupo de amostras.

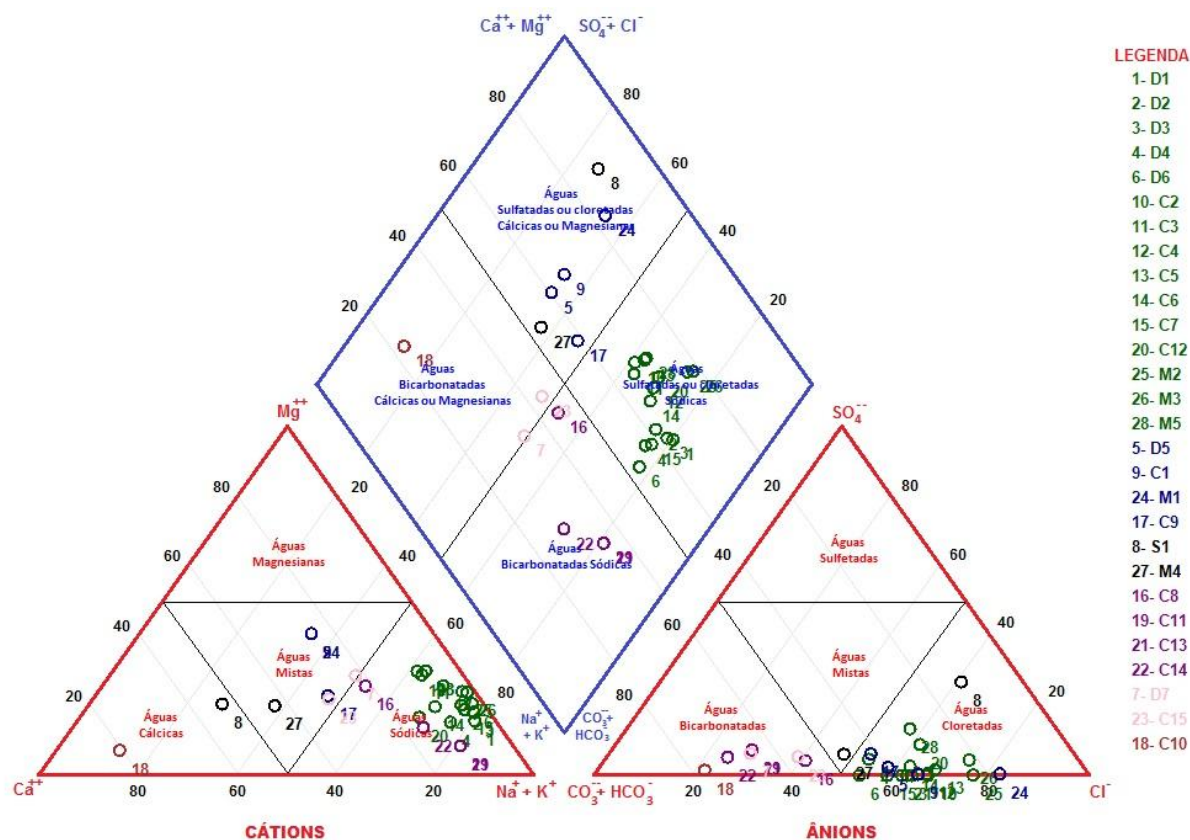
Observando o diagrama nota-se que existe um crescimento no teor de cálcio (Ca^{2+}) entre as amostras S1 < C10 e de carbonatos e bicarbonatos nas amostras C8 < C11 < C14 < C10 caracterizando um aumento gradativo de teores destes elementos, possivelmente, decorrente da dissolução dos minerais de composição carbonática. Nota-se, também, a existência de águas

misturadas (campo “mistas” do diagrama), elevação dos teores de sódio e potássio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) entre as amostras $\text{C6} < \text{D2} < \text{D1}$, provavelmente, em decorrência da dissolução ou trocas iônicas entre as argilas. Além do aumento gradativo no teor de cloreto entre as amostras $\text{D2} < \text{D1} < \text{C6}$ como resultado, presumivelmente, da influência de águas em áreas próximas a recargas.

Segundo Feitosa (2008), em aquíferos sedimentares com mineralogia heterogênea a composição química da água torna-se variável com o fluxo. Isso em consequência da dissolução e precipitação de minerais, troca iônica e modificações nas condições redox. No entanto, esses processos são dependentes do tempo de residência da água, profundidade, interação rocha-água, etc.

Leão (2003) constatou uma ampla faixa de variações de idade/ tempo de residência nesta área resultante da proximidade de áreas de recargas, localização de falhas, captação de águas em maiores ou menores profundidades.

Figura 4.1: Diagrama Triangular de Piper e a classificação das águas subterrâneas.



Fonte: A Autora.

4.2 SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS

Os sólidos totais dissolvidos (STD) correspondem ao peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume, ou seja, representa a concentração de todo o material dissolvido na água, volátil ou não. A condutividade elétrica (CE) é a medida da facilidade de a água conduzir corrente elétrica e está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons (FEITOSA, 2008).

Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357/2005, com base no STD as águas podem ser divididas em doces, salobras e salinas de acordo com as definições do Quadro 4.1.

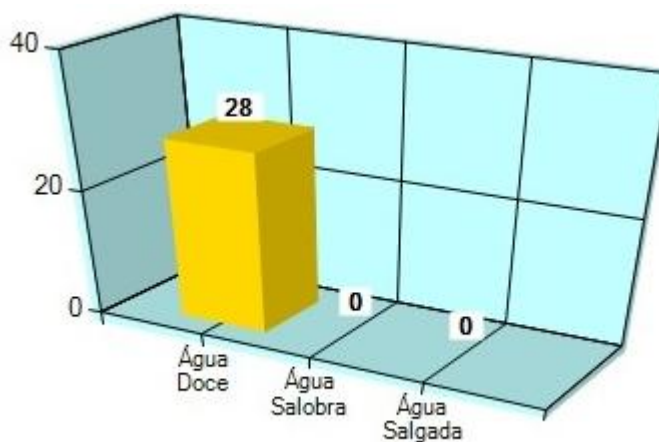
Quadro 4.1: Definição de águas doces, salobra e salina.

Tipo de Água	STD (mg/L)
Doce	0 – 500
Salobra	501 – 1500
Salina	> 1500

Fonte: Resolução CONAMA 357/2005.

Segundo esta Resolução, todos os 28 poços tubulares avaliados foram classificados como contendo água doce (Figura 4.2).

Figura 4.2: Classificação em relação aos Sólidos Totais Dissolvidos.



Fonte: A Autora.

CAPÍTULO 5

QUALIDADE DAS ÁGUAS

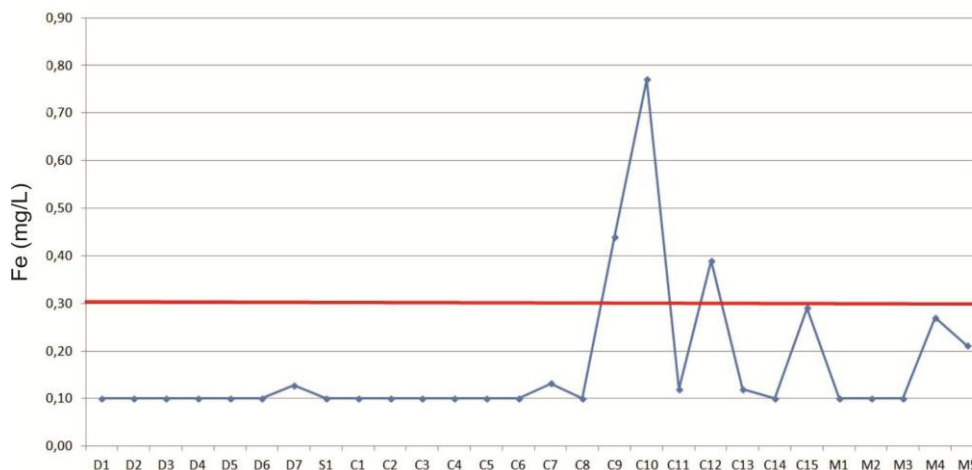
5.1 POTABILIDADE

Para determinar a qualidade das águas subterrâneas foram utilizados: (i) Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde, de 12 de dezembro de 2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e (ii) a Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008 que dispõe sobre a classificação das águas subterrâneas. Os parâmetros analisados que continham seus respectivos valores máximos permitidos (VMP) nas resoluções citadas encontram-se na Tabela 5.1.

A maioria dos íons apresenta valores dentro do limite de potabilidade segundo a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde e a Resolução CONAMA nº 396, com exceção do ferro total (valores médios acima de 0,3 mg/L) (Figura 5.1). Nesse aspecto, considera-se que apenas as amostras C9, C10 e C12 não são adequadas ao consumo humano.

De acordo com o Artigo 3º da Resolução CONAMA nº 396, estas águas podem ser enquadradas na Classe 2 “águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais”.

Figura 5.1: Distribuição do ferro nas amostras. A linha vermelha indica o limite máximo permitido pelas resoluções de 0,3 mg/L.



Fonte: A Autora.

Tabela 5.1: Resultados analíticos das águas subterrâneas.

	Sulfato	Cloreto	Alumínio	Cromo	Ferro	Manganês	Sódio	Zinco	STD
Unidade	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Conama 396	250,00	250,00	0,20	0,05	0,30	0,10	200,00	5,00	1000,00
MS 2.914/2011	250,00	250,00	-	0,05	0,30	-	200,00	-	1000,00
D1	0,00	7,88	0,10	0,10	0,10	0,01	3,59	0,01	61,00
D2	0,00	7,22	0,10	0,10	0,10	0,01	1,69	0,01	25,00
D3	0,00	7,55	0,10	0,10	0,10	0,01	2,65	0,01	33,00
D4	0,66	5,53	0,10	0,10	0,10	0,01	0,82	0,01	25,00
D5	0,35	6,47	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,01	43,00
D6	0,00	5,06	0,10	0,10	0,10	0,01	1,80	0,01	22,00
D7	2,60	8,50	-	-	0,13	-	10,80	-	88,00
S1	13,00	21,61	0,10	0,10	0,10	0,07	12,05	0,01	216,00
C1	0,06	8,34	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,01	9,00
C2	0,00	9,09	0,10	0,10	0,10	0,01	2,04	0,01	21,00
C3	0,08	8,34	0,10	0,10	0,10	0,01	1,59	0,01	7,00
C4	0,09	9,09	0,10	0,10	0,10	0,01	1,97	0,01	17,00
C5	0,33	9,89	0,10	0,10	0,10	0,01	1,47	0,01	2,00
C6	0,45	7,88	0,10	0,10	0,10	0,01	5,12	0,01	7,00
C7	0,00	6,38	0,10	0,10	0,13	0,01	3,00	0,01	3,00
C8	1,00	7,00	-	-	0,10	-	5,50	-	102,00
C9	2,80	17,50	-	-	0,44	-	8,50	-	82,00
C10	1,00	10,50	-	-	0,77	-	6,00	-	72,00
C11	4,02	11,30	-	-	0,12	-	20,00	-	107,00
C12	6,00	30,40	-	-	0,39	-	19,00	-	54,00
C13	4,02	11,30	-	-	0,12	-	20,00	-	107,00
C14	2,98	10,10	-	-	0,10	-	24,00	-	102,00
C15	1,79	9,38	-	-	0,29	-	5,00	-	43,00
M1	0,16	20,28	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,01	1,00
M2	0,03	14,44	0,10	0,10	0,10	0,01	5,25	0,01	6,00
M3	1,21	14,72	0,10	0,10	0,10	0,01	4,69	0,01	8,00
M4	2,71	15,50	-	-	0,27	-	9,00	-	86,00
M5	5,00	15,70	-	-	0,21	-	11,70	-	150,00

5.2 IRRIGAÇÃO

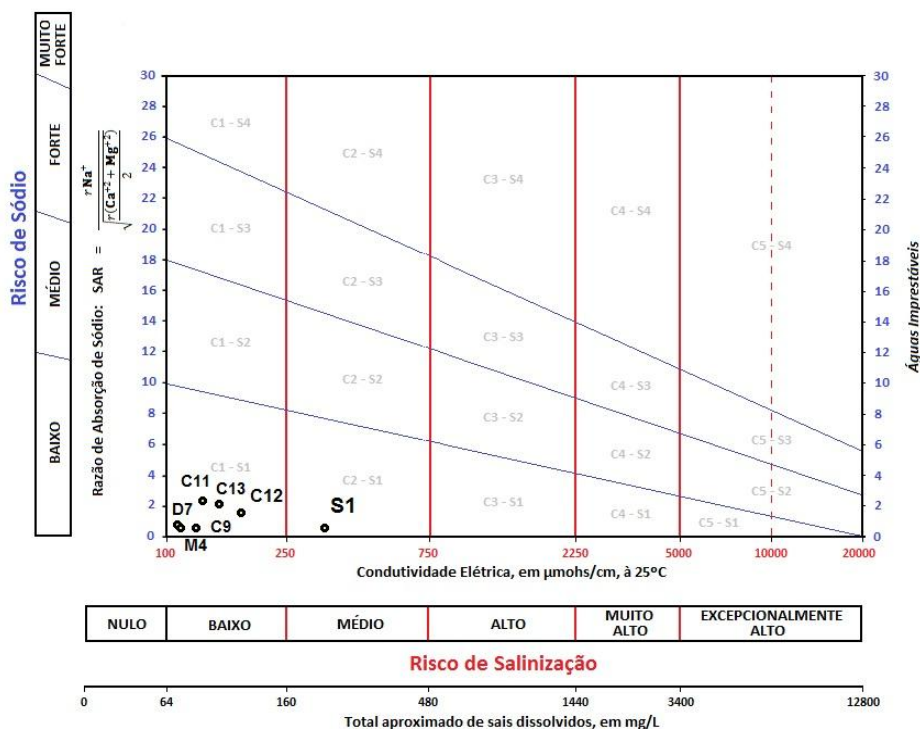
A classificação das águas para irrigação poderá ser determinada através da concentração de alguns íons, tais como o sódio, cálcio e magnésio, e parâmetros como os sais dissolvidos, condutividade elétrica e a concentração total de cátions, que influenciam de maneira diferenciada no crescimento de cada espécie vegetal (FEITOSA, 2008).

O *Sodium Absorption Ratio* (SAR) ou Razão de Absorção de Sódio (RAS) é utilizada, juntamente com a condutividade elétrica, para a classificação da água para fins de irrigação. Quanto maior for o SAR e a condutividade elétrica menos apropriada à água será para irrigação. O SAR é uma razão que indica a percentagem de sódio contido numa água que pode ser adsorvido pelo solo, e é calculado segundo expressão:

$$\text{SAR} = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{r(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})}{2}}}$$

Onde r representa as concentrações de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} em miliequivalentes por litro (meq/L). As categorias de águas da classificação do *United States Salinity Laboratory* (USSL) encontradas na área estão relacionadas na Figura 5.2.

Figura 5.2: Diagrama de Lemoine (1954) do USSL.



Fonte: A Autora.

Na área de estudo, o parâmetro RAS varia de 0,0535 a 2,3713 indicando tratar-se de uma água que apresenta um baixo risco de salinização (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Resultado da classificação das águas para irrigação.

%	Identificação	Classe USLL	Usos
71,4	D1		
	D2		
	D3		
	D4		
	D5		
	D6		
	C1		
	C2		
	C3	C0	Águas de muito baixa salinidade, que podem ser utilizadas sem restrição para irrigação.
	C4		
	C5	S1	Água fracamente sódica. Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de aparição de teores nocivos de sódio suscetível de troca. Presta-se ao cultivo de quase todos os vegetais.
	C6		
	C7		
	C8		
	C10		
C15			
M1			
M2			
M3			
M5			
25,0	D7		
	C9		
	C11	C1	Águas de baixa salinidade, que podem ser utilizadas na maioria das culturas e solos, com pequeno risco de incidentes quanto à salinização do solo, salvo se a permeabilidade deste último for extremamente baixa.
	C12		
	C13	S1	Água fracamente sódica. Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de aparição de teores nocivos de sódio suscetível de troca. Presta-se ao cultivo de quase todos os vegetais.
	C14		
M4			
3,6		C2	Águas de salinidade média. Devem ser usadas com precaução. Os vegetais de fraca tolerância salina podem ser cultivados, na maioria dos casos, sem perigo.
	S1	S1	Água fracamente sódica. Podem ser utilizadas em quase todos os solos com fraco risco de aparição de teores nocivos de sódio suscetível de troca. Presta-se ao cultivo de quase todos os vegetais.

Fonte: Adaptado de FEITOSA, 2008.

5.3 INDÚSTRIAS

A identificação das características qualitativas da água consumida na indústria é definida através da caracterização das atividades e dos processos industriais desenvolvidos. Na Tabela 5.3 são apresentados os critérios de qualidade da água para a indústria definido por Mathess (1982), Szikazay (1993) e Dricoll (1986).

Tabela 5.3: Parâmetros estabelecidos para a qualidade da água na indústria.

Parâmetro	Unid	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	-	-	-	7,5	-	6,5 - 7	-	8	-	-
Dureza	mg/L	50	180	50-80	30-100	50 - 75	25	50	50	100
Alcalinidade		-	-	80-150	-	-	128	135	-	-
Cálcio		-	-	500	20	200	-	-	10	-
Cloreto		-	30	-	20	100	250	-	100	75
Ferro		0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,25	0,10
Manganês		0,5	0,1	0,2	-	0,1	0,2	0,2	0,25	0,05
R.S.		-	500	850	-	1000	850	-	-	200
Nitrato		-	30	15	-	10	-	-	-	-
Amônia		-	Traços	0,5	-	-	-	-	-	-
Sulfatos		-	60	-	20	-	250	-	100	-
Fluoretos		-	-	1,0	-	1,0	1,0	-	-	-
Magnésio	-	-	-	10	30	-	-	-	-	

R.S.: Resíduo seco; 1: Águas de refrigeração; 2: Ind. laticínios; 3: Ind. de conservas alimentícias; 4: Ind. açucareira; 5: Cervejaria; 6: Ind. de bebidas e suco de frutas; 7: Curtume; 8: Indústria têxtil; 9: Indústria de papel.

Fonte: Mathess (1982), Szikazay (1993) e Dricoll (1986).

Com relação as águas destinadas a refrigeração, apenas a amostra C10 apresentou alteração no teor de ferro com valor de 0,77 mg/L. Todas as outras amostras encontram-se dentro do padrão estabelecido para esse uso.

Para as águas destinadas as indústrias de laticínios houve alteração no teor de cloreto na amostra C12 e de ferro nas amostras C9, C10, C12. As 25 amostras restantes encontram-se em níveis de qualidade adequados para este uso.

Em relação as indústrias de conservas alimentícias, a amostra C15 apresentou pH adequado (7,5) e a amostra S1 apresentou alcalinidade adequada (entre 80 e 150 mg/L). E as amostras C9, C10, C12, C15 e M4 apresentaram alterações nos teores de ferro com valores >0,20 mg/L. Logo, não foram identificadas amostras dentro do padrão de qualidade estabelecido para esta utilização.

Para o uso destinado a indústria açucareira, as amostras S1 e C10 apresentaram incoformidades nos teores de cálcio. As amostras S1, C12 e M1 apresentaram alteração no cloreto e C9, C10, C12, C15, M4 e M5 apresentaram alteração nos teores de ferro. Dessa forma, 20 amostras foram consideradas adequadas ao uso.

Na análise das amostras destinadas as cervejarias, apenas as amostras D7, C8, C12 e M4 estão em conformidade com o pH. As amostras C9, C10, C12, C15, M4, M5 apresentam alteração do ferro. Assim sendo, apenas as amostras D7 e C8 encontram-se dentro do padrão estabelecido para utilização.

Com relação às águas destinadas as indústrias de bebidas e suco de frutas, houve alteração no teor de ferro nas amostras C9, C10, C12, C15, M4. Desta maneira, 23 amostras são adequadas para essa utilização.

Para as águas destinadas ao curtume, foram identificadas alterações nos teores de ferro (amostras C9, C10, C12, C15, M4) e no pH em todas as amostras. Sendo assim, as amostras analisadas são inadequadas para este uso.

Em relação às águas destinadas a indústria têxtil as amostras S1, C10, M4 apresentaram alteração no teor de cálcio com valores superiores a 10 mg/L. E alteração do teor de ferro nas amostras C9, C10, C12, C15, M4. Logo, 22 amostras são consideradas adequadas ao uso nas indústrias têxteis.

Para a utilização das águas na indústria de papel a amostra S1 apresentou alteração no teor recomendado para manganês. E as amostras D7, C7, C9, C10, C11, C12, C13, C15, M4, M5 contém alterações nos teores de ferro. Deste modo 17 amostras estão adequadas a essa destinação.

Atualmente existem técnicas modernas de tratamento de água que permitem, na maioria das vezes, que águas de composições diferentes sejam utilizadas para qualquer uso industrial (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

CAPÍTULO 6

RELAÇÕES IÔNICAS CARACTERÍSTICAS

A água de um aquífero passa por modificações progressivas decorrentes das reações químicas que ocorrem com a rocha durante o fluxo subterrâneo. Sabe-se que a composição da água é um reflexo, principalmente, da composição mineralógica da rocha onde ela circula, uma vez que os íons liberados para a água estão relacionados com a decomposição química e bioquímica dos seus minerais.

Através do reconhecimento dos litotipos constituintes do aquífero pode-se estabelecer uma correlação entre a composição química da água subterrânea e das rochas as quais ela percola. A análise destas relações foi desenvolvida através do estudo das relações iônicas onde as concentrações dos cátions e ânions são expressas em miliequivalentes (meq/L).

A identificação dos fácies hidroquímicos foi realizada através do Diagrama Triangular de Piper. Observou-se que existem dois fácies hidroquímicos bem definidos: o fácies cloretada e o fácies bicarbonatada com ocorrência de graduações na composição catiônica. Isso se deve ao fato de que os cátions são mais passíveis de participarem de reações de troca iônica e precipitação, portanto, tendem a apresentar mudanças mais significativas que os ânions (FEITOSA, 2008).

O fácies cloretada, muito bem definido, destaca-se com as classes:

- Cloretada sódica (15 amostras);

- Cloretada mista (4 amostras);

- Cloretada cálcica (1 amostra);

- Mista mista (1 amostra).

O Quadro 6.1 mostra as relações iônicas e classificação das águas cloretadas.

Quadro 6.1: Relações iônicas e classe das águas subterrâneas para o fácies hidroquímico cloretada.

Sigla	Cátions	Ânions	Porcentagem	Classe
D1	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$	71,43%	Cloretada Sódica
D2	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
D3	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
D4	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
D6	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C2	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C3	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C4	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C5	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C6	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C7	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
C12	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
M2	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
M3	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Sódica
M5	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$	Cloretada Sódica	
D5	$rMg^{2+} > Na^+ + K^+ > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$	14,29%	Cloretada Mista
C1	$rMg^{2+} > Na^+ + K^+ > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Mista
M1	$rMg^{2+} > Na^+ + K^+ > Ca^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Cloretada Mista
C9	$rCa^{2+} > Na^+ + K^+ > Mg^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$	9,52%	Cloretada Mista
M4	$rCa^{2+} > Na^+ + K^+ > Mg^{2+}$	$rCl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$		Mista Mista
S1	$rCa^{2+} > Na^+ + K^+ > Mg^{2+}$	$rCl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$	4,76%	Cloretada Cálcica

O fácies hidroquímico bicarbonatada destaca-se com as classes:

- Bicarbonatada sódica (4 amostras);
- Bicarbonatada mista (2 amostras);
- Bicarbonatada cálcica (1 amostra).

O Quadro 6.2 mostra as relações iônicas e classificação das águas bicarbonatadas.

Quadro 6.2: Relações iônicas e classe das águas subterrâneas para o fácies hidroquímico bicarbonatada.

Sigla	Cátions	Ânions	Porcentagem	Classe
D7	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$	28,57%	Bicarbonatada Mista
C8	$rNa^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$		Bicarbonatada Sódica
C10	$rCa^{2+} > Na + K > Mg^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$	14,29%	Bicarbonatada Cálcica
C11	$rNa^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$	57,14%	Bicarbonatada Sódica
C13	$rNa^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$		Bicarbonatada Sódica
C14	$rNa^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$		Bicarbonatada Sódica
C15	$rNa^+ + K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	$rHCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$		Bicarbonatada Mista

As relações entre os ânions mostram enorme predominância do cloreto sobre o bicarbonato e o sulfato. Do mesmo modo, o sódio, em termos de teor, é relativamente mais abundante que o cálcio e o magnésio no subgrupo dos cátions.

O cloreto (Cl^-), em geral, é muito solúvel e muito estável em solução, logo, dificilmente precipita. Sua alta solubilidade e o lento movimento das águas no aquífero provocam aumentos gradativos e constantes dos teores deste elemento nas águas subterrâneas na direção do fluxo (FEITOSA, 2008).

Águas mais ácidas aceleram a dissolução de carbonatos, resultando em águas ricas em Ca^{2+} e Mg^{2+} fato observado nas amostras D5, C1, M1, C9, S1, M4. O cátion $Na^+ + K^+$ foi substituído a água pelo Ca^{2+} ou Mg^{2+} , além da influência do pH, poderá existir a influência de lentes de folhelhos (argilitos), devido a troca de bases que ocorrem na estrutura cristalina e nos espaços interfoliares dos argilominerais que compõem essas rochas sedimentares. Esses argilominerais seriam preferencialmente as ilitas do grupo T-O-T (tetraédro-octaédro-tetraédro). A caulinita não tem boa capacidade de troca de bases por ser um argilomineral do grupo T-O (tetraédro-octaédro).

De acordo com Lima (1999) os filossilicatos frequentes na Formação São Sebastião são: a caulinita $[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$, ilita, clorita $[(Mg, Al, Fe)_{12}(Si, Al)_8O_{20}(OH)_{16}]$. Associados a estes filossilicatos ocorrem, frequentemente e abundantemente, a pirita, nódulos de manganês, fósseis e conchas.

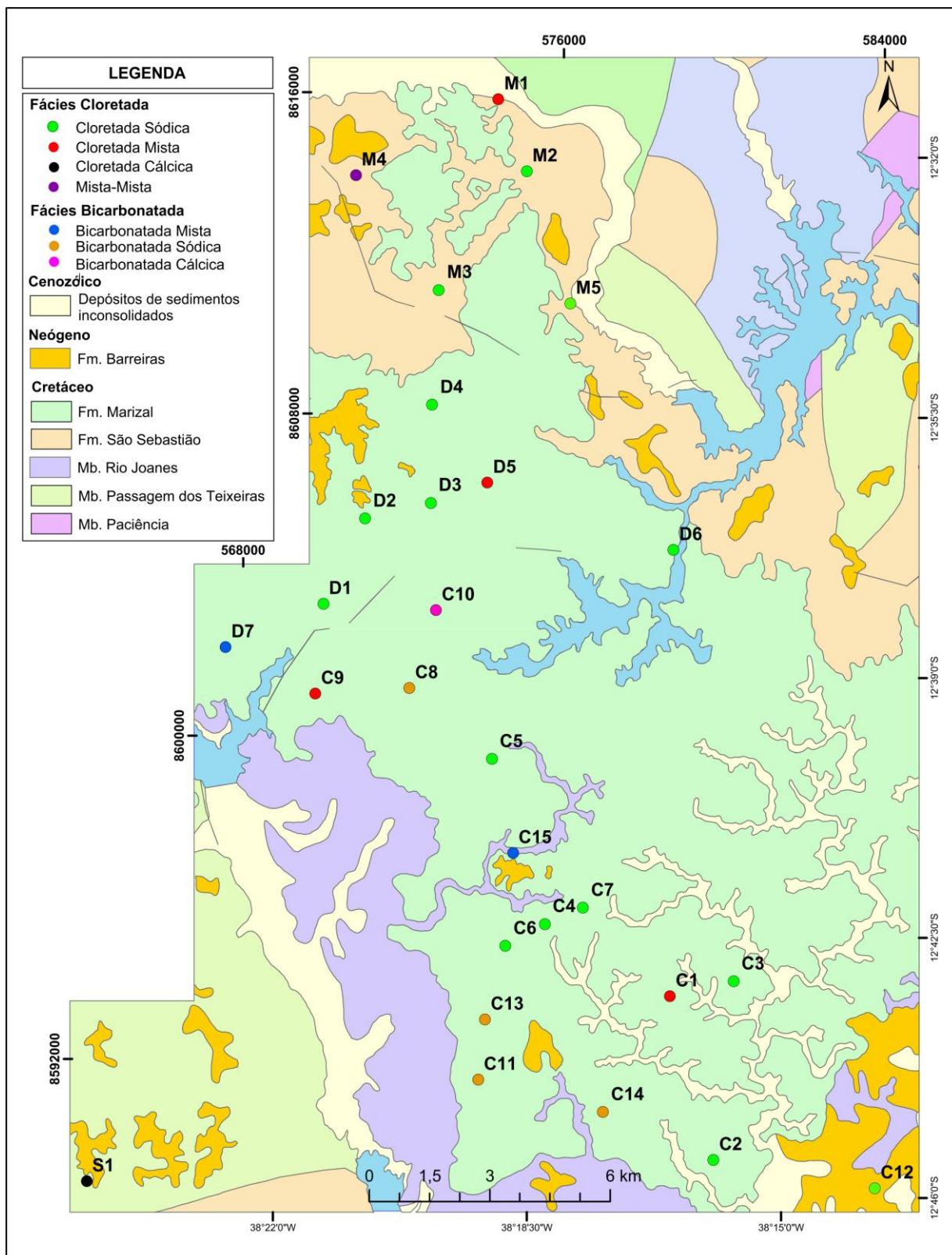
Em zonas profundas pode haver uma maior concentração de sais caracterizada pelos fácies hidroquímicos cloretos e sulfatos encontrados na amostra S1 a qual, acredita-se, está localizada no membro Passagem dos Teixeiras. Na descrição litológica deste poço foi

identificado a presença de folhelhos cinza e cinza esverdeados resultantes da presença da clorita e dos nódulos piritosos.

Quando o HCO_3^- predomina sobre o Cl^- deve-se a presença e influência de níveis de calcário. Águas bicarbonatadas (quando rasas) podem ser decorrentes da dissolução do CO_2 da matéria orgânica presente no solo. Os íons de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ são mais móveis e permanecem na água depois de liberados no processo de intemperismo. Os elementos Si^{4+} e K^+ estão na escala intermediária de mobilidade, enquanto Al^{3+} e Fe_{total} são imóveis e permanecem nos solos. Os elementos Al^{3+} , Fe_{total} e Si^{4+} formam minerais secundários que ficam nos solos, e o K^+ permanece nos minerais mais resistentes (FEITOSA, 2008).

Na Figura 6.1 são identificados e localizadas as amostras e seus respectivos fácies hidroquímicos.

Figura 6.1: Distribuição dos fácies hidroquímicas identificadas.



Fonte: CPRM, 2004.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizado um sumário estatístico utilizando-se 17 parâmetros em 28 amostras, matriz de correlação de Spearman, Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey. Para os parâmetros cujas concentrações estavam abaixo do valor de detecção dos aparelhos, foram utilizados o valor mínimo de detecção, no entanto, quando todos os valores estavam abaixo desse limite os parâmetros foram excluídos. São estes: alumínio, cromo, manganês e zinco.

7.1 SUMÁRIO ESTATÍSTICO

O estudo estatístico foi utilizado para se determinar a variabilidade e a dispersão da concentração dos elementos em relação à média. Optou-se pela utilização da estatística não paramétrica em virtude da distribuição numérica de quase todos os parâmetros estudados apresentarem uma distribuição assimétrica. Na Tabela 7.1 é apresentado o sumário estatístico.

Tabela 7.1: Sumário estatístico para os parâmetros físico-químicos.

	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Alc	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Fe _{total}	K ⁺	Mg ²⁺
	mg/L								
Número de amostras	28	28	17	28	28	28	28	28	28
Média Aritmética	1,8	11,3	13,1	1,9	13,8	4,4	0,2	4,0	1,7
I.C. -95%	0,7	9,1	-1,3	1,1	7,5	0,9	0,1	2,6	1,1
I.C. +95%	2,9	13,5	27,4	2,8	20,1	7,9	0,2	5,4	2,3
Mediana	0,6	9,2	4,3	2,5	2,5	0,5	0,1	3,4	1,2
Valor Mínimo	0	5,0	0,0	0,0	3	0	0	0	0
Valor Máximo	13,0	30,4	115,0	12,0	51,0	42,5	0,8	12,0	5,8
Quartil 25%	0,0	7,7	0,0	0,0	2,5	0,1	0,1	0,4	0,5
Quartil 75%	2,8	14,6	11,8	2,5	24,6	5,0	0,1	6,4	2,6
Percentil 10%	0,0	6,4	0,0	0,0	2,5	0,1	0,1	0,1	0,1
Percentil 90%	5,0	20,3	37,5	2,5	44,9	11,9	0,4	10,0	3,7
Amplitude Interquartil	2,7	6,9	11,8	2,5	22,1	4,9	0,0	5,9	2,1
Assimetria	2,69	1,74	3,42	3,06	1,12	3,35	2,96	0,71	1,08

Continuação....

	Na ⁺	Si ⁴⁺	pH	Eh	CE	Turb	OD	STD
	mg/L		-	µvolt	µS/cm	UNT	mg/L	
Número de amostras	28	27	28	17	28	28	17	26
Média Aritmética	6,7	7,1	5,5	351,4	72,7	83,6	16,4	49,8
I.C. -95%	4,1	3,4	4,9	248,8	45,0	37,7	11,1	28,6
I.C. +95%	9,3	10,8	6,1	454,1	100,4	129,5	21,8	71,0
Mediana	4,8	1,9	5,5	402,0	54,0	3,0	13,1	29,0
Valor Mínimo	0	0	3	-394	3	0	5	1
Valor Máximo	24,0	33,3	8,2	463,0	333,0	325,0	42,9	216,0
Quartil 25%	1,7	0,0	4,4	369,0	16,5	1,4	12,0	8,0
Quartil 75%	9,9	12,6	7,0	440,0	110,5	213,0	19,6	82,0
Percentil 10%	0,1	0,0	3,5	292,0	5,0	0,5	4,9	3,0
Percentil 90%	20,0	19,6	7,5	462,0	150,0	272,0	35,6	107,0
Amplitude Interquartil	8,2	12,6	2,5	71,0	94,0	211,6	7,6	74,0
Assimetria	1,29	1,25	0,09	-3,62	1,93	0,95	1,43	1,59

O valor médio (mediana) dos STD foi de 49,8 mg/L com valor mínimo e máximo variando, respectivamente, de 1 a 216,0 mg/L. Estatisticamente, a faixa de valores normais na área é de 8,0 mg/L (2º quartil) a 82,0 mg/L (3º quartil). Valores acima de 82,0 mg/L já podem ser considerados altos e 107,0 mg/L (Percentil 90%) são, estatisticamente, muito alto considerando um total de 26 poços tubulares.

A mediana do ferro total é 0,2 mg/L com valores mínimos e máximos variando de 0 a 0,8 mg/L. Estatisticamente, a faixa de valores normais na área é de 0,1 mg/L, sendo que valores acima de 0,4 mg/L (percentil 90%) já podem ser considerados elevados.

O valor médio (mediana) do CO₃²⁻ foi de 2,5 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de 0 a 12,0 mg/L. Porém, estatisticamente, a faixa de valores normais na área é de 0 mg/L (2º quartil) a 2,5 mg/L (3º quartil). Valores acima de 2,5 mg/L já podem ser considerados altos considerando um total de 28 poços tubulares.

O valor médio (mediana) do HCO₃⁻ foi de 2,5 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de 3 a 51,0 mg/L. Contudo, estatisticamente, a faixa de valores normais na área é de 2,5 mg/L (2º quartil) a 24,6 mg/L (3º quartil). Valores acima de 24,6 mg/L já podem

ser considerados altos e a partir de 44,9 mg/L (Percentil 90%) são estatisticamente muito alto considerando um total de 28 poços tubulares.

O valor médio (mediana) do Ca foi de 0,5 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de 0 a 42,5 mg/L. Porém estatisticamente faixa de valores normais na área é de 0,1 mg/L (2º quartil) a 5,0 mg/L (3º quartil). Valores acima de 5,0 mg/L já podem ser considerados altos e 11,9 mg/L (Percentil 90%) são estatisticamente muito alto considerando um total de 28 poços tubulares.

O valor médio (mediana) do Mg foi de 1,2 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de 0 a 5,8 mg/L. Porém estatisticamente faixa de valores normais na área é de 0,5 mg/L (2º quartil) a 2,6 mg/L (3º quartil). Valores acima de 2,6 mg/L já podem ser considerados altos e 3,7 mg/L (Percentil 90%) são estatisticamente muito alto considerando um total de 28 poços tubulares.

O valor médio (mediana) do pH foi de 5,5 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de 3 a 8,2 mg/L. Porém, estatisticamente, faixa de valores normais na área é de 4,4 mg/L (2º quartil) a 7,0 mg/L (3º quartil). Valores acima de 7,0 mg/L já podem ser considerados altos e 7,5 mg/L (Percentil 90%) são estatisticamente muito alto considerando um total de 28 poços tubulares.

O valor médio (mediana) do Eh foi de 402,0 mg/L com valor mínimo e máximo variando respectivamente de -394,0 a 463,0 mg/L. Porém estatisticamente faixa de valores normais na área é de 369,0 mg/L (2º quartil) a 440,0 mg/L (3º quartil). Valores acima de 440,0 mg/L já podem ser considerados altos e 462,0 mg/L (Percentil 90%) são estatisticamente muito alto considerando um total de 17 poços tubulares.

O cálcio e o silício são os constituintes maiores que apresentam uma maior discrepância entre as concentrações mínima e máxima. As concentrações de cloreto apresentam variações entre 5 a 30 mg/L.

Verificando o valor da assimetria (S_3) para todos os parâmetros, nota-se que a mesma está acima do valor crítico ($S_3 > 0,66$), considerando um nível de significância de 5% e um número de amostra inferior a 30. A única exceção são os valores do pH e dos isótopos. Sendo

assim, não poderemos utilizar a estatística gaussiana com valores de assimetria altos. Optamos assim, pela utilização da mediana e pelo 1º e 3º quartil para estabelecer as faixas com valores normais e anômalos. Ao mesmo tempo, para a matriz de correlação utilizou-se o modelo de Spearman.

7.2 MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN

Com o intuito de verificar a associação entre os elementos analisados nas águas subterrâneas foi utilizada a correlação de Spearman (Tabela 7.2).

O coeficiente de correlação de Spearman (ρ) é uma medida do grau de relação entre duas variáveis quantitativas. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. Se existir uma correlação positiva forte, ρ está próximo de 1. Se a correlação for negativa forte, ρ está próximo de -1. Se não há correlação ou uma correlação fraca, ρ está próximo de zero. É importante ressaltar que se ρ está próximo a zero, não significa que não existe relação entre os elementos, significa apenas que não há uma relação linear.

Para o total de 28 amostras utilizadas nos cálculos do coeficiente de correlação de Spearman o valor crítico adotado foi de 0,32 para um nível de significância de 0,05. As possíveis associações ocorrem em virtude de os elementos apresentarem mobilidades similares, tendendo então a agruparem-se em um mesmo local. Adotou-se o valor $\geq 0,70$ para definir as correlações fortes entre os parâmetros analisados.

A partir da observação da correlação de Spearman identificou-se que o SO_4^{2-} apresenta correlação linear com o HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Si^{4+} . A alcalinidade se correlaciona fortemente com o Si^{4+} .

O HCO_3^- apresenta forte correlação com os íons de SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Fe_{total} , Na^+ , Si^{4+} , pH e condutividade elétrica. O Ca^{2+} demonstra correlação com SO_4^{2-} , HCO_3^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ e Si^{4+} . O Fe_{total} apresenta forte correlação com o HCO_3^- e o pH.

O Mg^{2+} tem forte correlação com o Si^{4+} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-} . O pH correlaciona-se com HCO_3^- e o Fe_{total} . A condutividade elétrica está correlacionada com o SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ e sólidos totais dissolvidos.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) e a condutividade elétrica (CE) que expressam a salinidade da água estão associados ao SO_4^{2-} , HCO_3^- e Na^+ , sendo esses parâmetros os maiores responsáveis pela salinização da água que na área é considerada água doce.

Tabela 7.2: Matriz de correlação de Serman

	SO ₄	Cl	Alc	CO ₃	HCO	Ca	Fe	K	Mg	Na	Si	Prof	pH	Eh	CE	Turb	OD	STD
SO ₄	1,00	0,66	0,13	-0,67	0,71	0,71	0,53	0,58	0,75	0,75	0,78	0,20	0,62	0,15	0,72	-0,23	0,22	0,70
Cl	0,66	1,00	0,18	-0,35	0,40	0,53	0,42	0,35	0,59	0,54	0,49	0,17	0,35	0,55	0,36	0,12	0,21	0,27
Alc	0,13	0,18	1,00			0,68	0,00	0,66	0,57	0,11	0,78	0,50	-0,04	0,02	-0,09	0,02	-0,04	-0,10
CO ₃	-0,67	-0,35		1,00	-0,75	-0,53	-0,50	-0,66	-0,62	-0,67	-0,87	-0,48	-0,61		-0,65	0,21		-0,63
HCO ₃	0,71	0,40		-0,75	1,00	0,75	0,70	0,61	0,67	0,79	0,86	0,37	0,81		0,71	-0,20		0,71
Ca	0,71	0,53	0,68	-0,53	0,75	1,00	0,67	0,71	0,92	0,77	0,90	0,25	0,56	-0,03	0,63	-0,14	0,17	0,62
Fe	0,53	0,42	0,00	-0,50	0,70	0,67	1,00	0,53	0,59	0,55	0,67	0,22	0,71	-0,20	0,48	0,02	0,36	0,42
K	0,58	0,35	0,66	-0,66	0,61	0,71	0,53	1,00	0,75	0,65	0,86	0,59	0,44	-0,00	0,46	0,03	0,01	0,40
Mg	0,75	0,59	0,57	-0,62	0,67	0,92	0,59	0,75	1,00	0,83	0,86	0,18	0,52	0,13	0,62	-0,09	0,20	0,62
Na	0,75	0,54	0,11	-0,67	0,79	0,77	0,55	0,65	0,83	1,00	0,76	0,17	0,54	-0,11	0,75	-0,25	0,38	0,74
Si	0,78	0,49	0,78	-0,87	0,86	0,90	0,67	0,86	0,86	0,76	1,00	0,53	0,65	0,02	0,67	-0,14	-0,05	0,62
Prof	0,20	0,17	0,50	-0,48	0,37	0,25	0,22	0,59	0,18	0,17	0,53	1,00	0,20	0,27	0,10	0,17	-0,05	-0,03
pH	0,62	0,35	-0,04	-0,61	0,81	0,56	0,71	0,44	0,52	0,54	0,65	0,20	1,00	0,24	0,44	-0,03	0,16	0,48
Eh	0,15	0,55	0,02			-0,03	-0,20	-0,00	0,13	-0,11	0,02	0,27	0,24	1,00	-0,39	0,27	-0,24	-0,39
CE	0,72	0,36	-0,09	-0,65	0,71	0,63	0,48	0,46	0,62	0,75	0,67	0,10	0,44	-0,39	1,00	-0,63	-0,40	0,93
Turb	-0,23	0,12	0,02	0,21	-0,20	-0,14	0,02	0,03	-0,09	-0,25	-0,14	0,17	-0,03	0,27	-0,63	1,00	0,51	-0,62
OD	0,22	0,21	-0,04			0,17	0,36	0,01	0,20	0,38	-0,05	-0,05	0,16	-0,24	-0,40	0,51	1,00	-0,40
STD	0,70	0,27	-0,10	-0,63	0,71	0,62	0,42	0,40	0,62	0,74	0,62	-0,03	0,48	-0,39	0,93	-0,62	-0,40	1,00

Alc = Alcalinidade total; CE = condutividade elétrica; OD = oxigênio dissolvido; STD = sólidos totais dissolvidos.

7.3 ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA)

Com o propósito de verificar se haveriam diferenças hidrogeológicas entre os três membros da Formação São Sebastião, utilizou-se a técnica estatística da Análise da Variância (ANOVA) de um fator. Para tanto, selecionou-se três grupos de poços tubulares a partir do mapa geológico e da profundidade desses poços.

Numa primeira aproximação esses três grupos de poços tubulares representariam os membros Rio Joanes, Passagem dos Teixeiras e Paciência. Nesse estudo comparativo utilizando-se a variância das médias entre os três grupos (membros) e dentro de cada um desses grupos. Foram utilizados os parâmetros cálcio, sulfato, cloreto, magnésio, sódio, potássio, condutividade elétrica, silício e bicarbonato. Os valores desses parâmetros não foram transformados logaritmicamente.

Partiu-se da hipótese (H_0) de que não haveria diferença significativa entre as variâncias das médias dos três membros. Os cálculos da razão F foram efetuados para todos os parâmetros referidos anteriormente.

Para testar a hipótese (H_0) faz-se a análise da variância dos grupos, em seguida compara-se as duas estimativas:

- Se $F > F_{\text{crítico}}$, rejeita-se a hipótese (H_0). Neste caso, existem diferenças estatisticamente significativas entre as variâncias das médias;
- Se $F < F_{\text{crítico}}$, a hipótese (H_0) não é rejeitada. Quando isso ocorre, diz-se que não existem evidências estatísticas de que as variâncias médias sejam diferentes.

A razão F é calculada através da relação:

$$F = \frac{S_B^2}{S_W^2}$$

Onde:

S_B^2 = é a variação entre os grupos (Kss superior, Kss médio, Kss inferior);

S_W^2 = corresponde a variação dentro dos grupos.

Para estimar, numericamente, a credibilidade de H_0 determina-se o valor-P que representa a probabilidade de ser obtida uma observação confiável da distribuição da razão F. Os valores críticos de F ($F_{\text{crítico}}$) correspondem a valores tabelados baseados num determinado intervalo de confiança de 95% e no número de amostras analisadas.

Nas Tabelas 7.3 a 7.11, a seguir, são apresentados a ANOVA para cada parâmetro.

Tabela 7.3: ANOVA para o cloreto.

CLORETO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	5	80,63	16,12	5,66		
Kss médio	5	65,11	13,02	39,22		
Kss inferior	18	171,20	9,51	30,32		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	188,93	2	94,46	3,40	0,049505	3,39
Dentro dos grupos	695,03	25	27,80			
Total	883,97	27				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.4: ANOVA para o sulfato.

SULFATO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	9,10	1,51	4,00		
Kss médio	6	20,40	3,40	23,25		
Kss inferior	19	20,83	1,09	3,24		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	24,28	2	12,14	1,74	0,192962	3,34
Dentro dos grupos	194,75	28	6,95			
Total	219,04	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.5: ANOVA para o sódio.

SÓDIO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	30,83	5,13	21,78		
Kss médio	6	42,95	7,15	18,58		
Kss inferior	19	114,03	6,00	64,01		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,38	2	6,19	0,12	0,880315	3,34
Dentro dos grupos	1354,05	28	48,35			
Total	1366,44	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.6: ANOVA para o potássio.

POTÁSSIO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	9,88	1,64	4,26		
Kss médio	6	27,85	4,64	11,54		
Kss inferior	19	74,21	3,90	16,07		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	31,18	2	15,59	1,18	0,320674	3,34
Dentro dos grupos	368,45	28	13,15			
Total	399,63	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.7: ANOVA para a condutividade elétrica.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	5	241,00	48,20	2776,70		
Kss médio	5	684,00	136,80	12951,20		
Kss inferior	18	1110,60	61,70	2901,66		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	25723,30	2	12861,65	2,86	0,075823	3,38
Dentro dos grupos	112239,90	25	4489,59			
Total	137963,20	27				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.8: ANOVA para o silício.

SILÍCIO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	23,72	3,953333	36,94211		
Kss médio	5	60,89375	12,17875	162,5453		
Kss inferior	19	107,5613	5,661118	73,67872		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	213,25	2	106,62	1,33	0,280697	3,35
Dentro dos grupos	2161,10	27	80,04			
Total	2374,36	29				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.9: ANOVA para o bicarbonato.

BICARBONATO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	50,30	8,38	98,20		
Kss médio	6	120,00	20,00	254,80		
Kss inferior	19	224,90	11,83	292,51		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	445,62	2	222,81	0,88	0,422984	3,34
Dentro dos grupos	7030,27	28	251,08			
Total	7475,89	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.10: ANOVA para o cálcio.

CÁLCIO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	13,68	2,28	22,43		
Kss médio	6	84,12	14,02	268,72		
Kss inferior	19	25,77	1,35	3,82		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	753,04	2	376,52	6,91	0,003625	3,34
Dentro dos grupos	1524,58	28	54,44			
Total	2277,63	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Tabela 7.11: ANOVA para o magnésio.

MAGNÉSIO						
Resumo						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Kss superior	6	8,90	1,48	2,41		
Kss médio	6	18,75	3,12	4,12		
Kss inferior	19	19,34	1,02	0,92		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	20,25	2	10,12	5,75	0,008073	3,34
Dentro dos grupos	49,28	28	1,76			
Total	69,53	30				

SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados.

Observando-se as Tabelas 7.3 a 7.9 nota-se que a razão F é menor que o $F_{\text{crítico}}$, portanto, existem semelhanças entre as variâncias dos elementos Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Si^{4+} , CE , K^+ , Na^+ nos três níveis que compõem a Formação São Sebastião, atendendo-se assim, a hipótese H_0 .

Ao examinar as Tabelas 7.10 e 7.11 nota-se que para os elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} a razão F é maior que o $F_{\text{crítico}}$, indicando que não existem semelhanças entre as variâncias dos grupos. Ou seja, para os parâmetros Ca^{2+} e Mg^{2+} existem variações ocorrendo entre dos grupos Kss superior, Kss médio e Kss inferior, não atendendo a hipótese H_0 .

7.4 TESTE DE TUKEY

A análise da variância para o cálcio e o magnésio mostrou uma rejeição para a hipótese H_0 pois o $F > F_{\text{crítico}}$, ou seja, existe uma diferença estatística entre as variâncias avaliadas para os três membros da Formação São Sebastião. Para verificar qual desses membros estaria diferenciando-se dos demais foi utilizado o teste de Tukey que é um teste complementar ao ANOVA, para os elementos cálcio e magnésio.

Para o elemento cálcio iniciou-se com o cálculo da diferença mínima significativa (*dms*) através da seguinte fórmula:

$$dms = q \cdot \sqrt{MQ / n^0 \text{ de repetições}}$$

Sendo que MQ é a média dos quadrados dentro dos grupos obtido no cálculo da ANOVA (Tabela 7.10). Para a obtenção do valor de q foi necessário consultar a tabela do teste de Tukey com $\alpha = 0,05$ e $K = 3$ (três membros da Formação São Sebastião) e o MQ (tabela 7.3). O q tabelado encontrado foi igual a 3,49 enquanto o valor do $MQ = 54,44$ e o número de repetições foi de 6 resultados.

$$\text{Assim, } dms = 3,49 \sqrt{54/6}, \text{ ou seja, } dms = 10,47.$$

Finalmente, comparou-se a diferença entre as médias dos membros da Formação São Sebastião com o valor do *dms*. Quando o valor da diferença entre as médias é maior ou igual ao

valor da *dms* significa que a diferença entre duas médias (dos membros) é significativa ($\mu_a \neq \mu_b$). No caso, se a diferença for menor ou igual ao *dms* significa que as médias são iguais ($\mu_a = \mu_b$).

Para o cálcio, os resultados mostraram que existe diferença entre a média do membro médio (Passagem Teixeira) com o membro superior (Rio Joanes) e inferior (Paciência). Os membros superiores e inferiores não apresentaram diferença significativa entre as suas respectivas médias (Quadro 7.1).

Quadro 7.1: Estudo comparativo entre as médias dos membros da Formação São Sebastião.

Comparações entre os membros	Diferença entre as médias (A)	<i>dms</i> (B)	Comparação entre A e B	Resultado
$K_{ssS} \times K_{ssM}$	$Ca K_{ssS} - Ca K_{ssM} = 11,7$	10,5	$A \geq B$	$\mu K_{ssS} \neq \mu K_{ssM}$
$K_{ssS} \times K_{ssI}$	$Ca K_{ssS} - Ca K_{ssI} = 0,93$	10,5	$A \leq B$	$\mu K_{ssS} = \mu K_{ssI}$
$K_{ssM} \times K_{ssI}$	$Ca K_{ssM} - Ca K_{ssI} = 12,7$	10,5	$A \geq B$	$\mu K_{ssM} \neq \mu K_{ssI}$

K_{ssS} : Membro Rio Joanes; K_{ssM} : Membro Passagem dos Teixeiras; K_{ssI} : Membro Paciência.

Para o magnésio que também apresentou um $F > F_{\text{crítico}}$ foi necessário o cálculo do teste de Tukey, iniciando-se pela diferença mínima significativa (*dms*). Para tanto foi verificado primeiramente o valor de **q** através da consulta da tabela do teste de Tukey com um nível de significância $\alpha = 0,05$, $K=3$ (três membros da Formação São Sebastião) e o MQ obtido no cálculo da ANOVA encontrado na Tabela 7.11, além do número de repetições.

$$dms = q \sqrt{MQ / n^0 \text{ de repetições}}$$

$$dms = 3,49 \sqrt{1,76/6}$$

$$dms = 1,90$$

Finalmente comparou-se a diferença entre as médias dos membros Rio Joanes (superior), Passagem Teixeira (médio) e Paciência (inferior). Com o valor do *dms*, cujos resultados encontram-se no Quadro 7.2.

Os resultados para o elemento magnésio mostraram que não existe diferença significativa entre o membro superior (Rio Joanes) e o membro médio (Passagem Teixeira) e inferior (Paciência). Porém, verifica-se uma diferença entre o membro médio (Passagem Teixeira) e o membro inferior (Paciência).

Quadro 7.2 Estudo comparativo entre as médias dos membros da Formação São Sebastião.

Comparações entre os membros	Diferença entre as médias (A)	dms (B)	Comparação entre A e B	Resultado
$K_{ssS} \times K_{ssM}$	$Mg K_{ssS} - Mg K_{ssM} = 1,6$	1,90	$A \leq B$	$\mu K_{ssS} = \mu K_{ssM}$
$K_{ssS} \times K_{ssI}$	$Mg K_{ssS} - Mg K_{ssI} = 1,3$	1,90	$A \leq B$	$\mu K_{ssS} = \mu K_{ssI}$
$K_{ssM} \times K_{ssI}$	$Mg K_{ssM} - Mg K_{ssI} = 2,9$	1,90	$A \geq B$	$\mu K_{ssM} \neq \mu K_{ssI}$

K_{ssS} : Membro Rio Joanes; K_{ssM} : Membro Passagem dos Teixeiras; K_{ssI} : Membro Paciência.

CAPÍTULO 8

ÍNDICE DE SATURAÇÃO, FASE MINERAL E ESPECIAÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS

Para determinar as fases minerais que se encontram nas águas subterrâneas do aquífero São Sebastião calculou-se o Índice de Saturação (IS) e as espécies que se encontram dissolvidas utilizando o *software* PHREEQE (PARKHURST et al., 1999). Os elementos químicos utilizados no cálculo foram: HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Cl^- , Fe_{total} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Si^{4+} , Al^{3+} , Cr, Mn, Zn e SO_4^- e também foram considerados os parâmetros pH e temperatura pois a precipitação ocorre por saturação da solução através da reação com o soluto ou mudanças de pH e Eh do meio (FEITOSA, 2008).

O índice de saturação (IS) indica se a solução está em equilíbrio, subsaturada ou supersaturada em relação a uma determinada fase sólida, ou seja, a tendência de dissolução ou precipitação de um mineral. É uma relação entre o Produto da Atividade Iônica (IAP) dos diversos cátions e ânions dissociados na água com constante do produto de solubilidade (K_{ps}), ou seja:

$$SI = \log \frac{IAP}{K_{ps}}$$

Quando o valor do IAP é maior que o K_{ps} , os valores do IS são positivos, proporcionando condições físico-químicas adequadas para a precipitação de fases minerais e o movimento da equação química é no sentido produtos-reagentes, ou seja, saturação. Em caso contrário, quando o IAP é menor do que o K_{ps} os produtos dissociados não se precipitam devido à condição de subsaturação. Desta forma o valor de IS será negativo e o sentido do movimento da equação é reagente-produto. Índices de saturação próximos de zero (- 0,05 a 0,05) indicam que a água está em equilíbrio com uma determinada fase mineral.

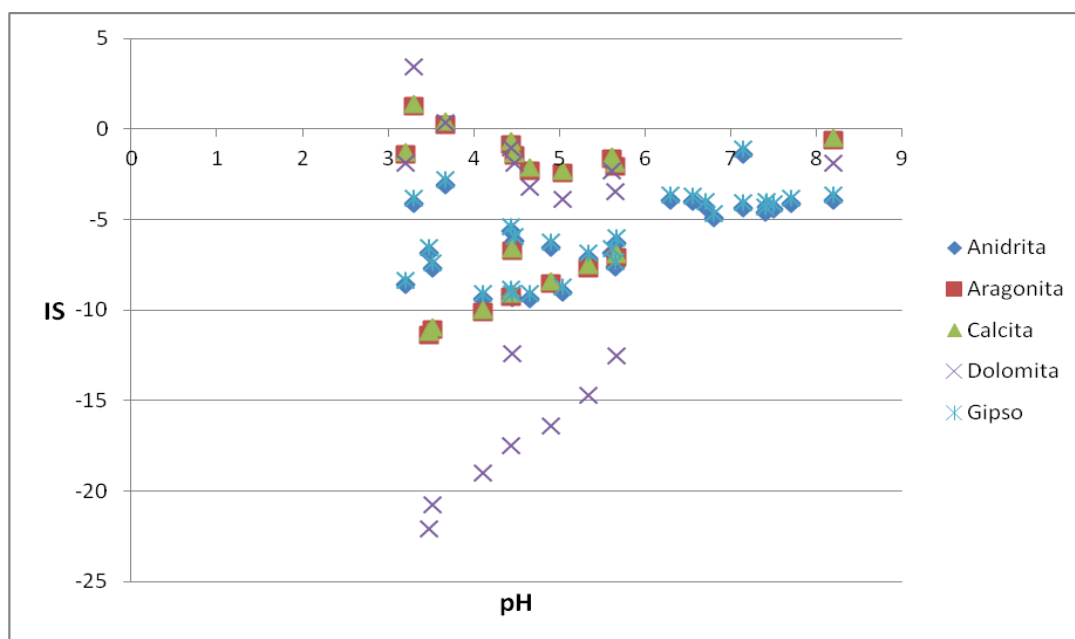
- $SI = 0$: estado de equilíbrio entre a fase mineral e a água;
- $SI < 0$: água insaturada, condição que favorece a dissolução mineral;
- $SI > 0$: água supersaturada, condição que favorece a precipitação da fase mineral.

8.1 ANÁLISE DOS ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Foram realizados os cálculos de IS para vinte e oito poços que captam água do aquífero São Sebastião. Estes índices foram selecionados e plotados no gráfico em função do pH para investigar os efeitos da dissolução e/ ou precipitação mineral nestas águas subterrâneas tendo em vista que o pH determina a solubilidade de muitos solutos. A análise da variância permitiu reduzir o grupo de variáveis a serem utilizadas para o Ca e Mg pois foi constatado que esses são os únicos elementos que apresentam variações significativas entre os membros da formação São Sebastião.

Nos minerais que contém o íon Ca em sua composição (anidrita, gipso, aragonita, calcita e dolomita) o IS apresentou valores entre - 20,74 e 3,44. No entanto, a maior parte das amostras apresentou IS negativo indicando que as águas se encontram subsaturadas para carbonatos (Figura 8.1). Identificou-se que nos poços C4 e S1 poderá haver a precipitação dos minerais aragonita, calcita e dolomita. Esses poços estão instalados, possivelmente, no Membro Rio Joanes e Membro Passagem dos Teixeiras, respectivamente.

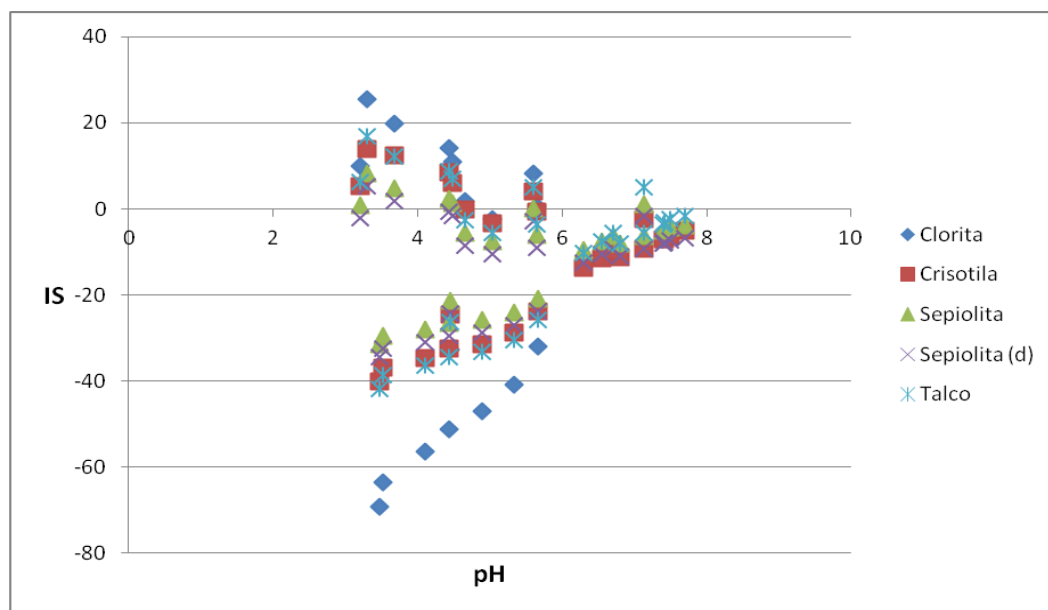
Figura 8.1: Relação entre os índices de saturação e o pH para as fases minerais do íon Ca.



Fonte: A Autora.

Para os minerais que contém o íon Mg (clorita, crisotila, sepiolita, sepiolita (d) e talco) os valores de IS encontrados estão entre - 69,11 e 25,52. Quase todas as amostras avaliadas obtiveram IS negativo demonstrando que a água está subsaturada para magnésio. Contudo, pode haver precipitação da fase mineral de clorita, crisotila, sepiolita, sepiolita (d) e talco nos poços C1, C2, C3, C4, C5, C6, C11, D6, S1 (Figura 8.2).

Figura 8.2: Relação entre os índices de saturação e o pH para as fases minerais do íon Mg.



Fonte: A Autora.

8.2 ESPECIAÇÃO QUÍMICA DOS ELEMENTOS

A especiação química descreve a distribuição dos elementos entre várias formas ou espécies, ou seja, a forma na qual um elemento está presente em uma dada matriz considerando a distinção entre diferentes estados de oxidação (TONIETTO, 2006). A biodisponibilidade, toxicidade e mobilidade dos íons metálicos estão diretamente ligadas à sua especiação.

O cálcio (Ca) está presente quase que exclusivamente sob a forma do cátion bivalente Ca^{2+} (96,61%), mas também ocorre sob a forma dos complexos CaSO_4 , CaCO_3 e CaOH^+ .

O magnésio (Mg) ocorre na água principalmente sob a espécie do cátion bivalente (Mg^{2+}), o qual representa 94,48% do magnésio total. Formas com o sulfato (MgSO_4), bicarbonato (MgHCO_3^+) e hidroxila (MgOH^+) constituem o restante das espécies químicas do magnésio.

Um dos elementos mais abundantes na água em estudo é o ferro (Fe) que ocorre em dois estados de oxidação, o Fe (II) e o Fe (III). A forma Fe (II) está presente na água principalmente sob as espécies Fe^{2+} (80,73%), FeSO_4^+ , Fe(OH)_3^- , Fe(OH)_2 , FeOH^+ , FeCO_3 . Já no estado Fe (III) as espécies predominantes são Fe(OH)_4^- (69,56%), Fe(OH)_2^+ , Fe(OH)_3^- , FeOH^{2+} .

O manganês (Mn) ocorre sob dois estados de oxidação: Mn (II) e o Mn (III). A forma Mn (II) se apresenta sob a forma das espécies Mn^{2+} (67,02%), MnCO_3 , MnOH^+ . O estado de oxidação Mn (III) ocorre essencialmente sob a forma Mn^{3+} (100%).

O cloro (Cl) encontra-se, unicamente, (100%) sob a forma Cl^- .

O potássio (K) está presente, majoritariamente, sob a forma K^+ (99,83% e minoritariamente sob a forma KSO_4^- (0,17%).

O silício (Si) ocorre como a espécie neutra H_4SiO_4 (69,14%), mas a espécie resultante da primeira dissociação (H_3SiO_4^-) surge com uma concentração representativa, 30,86%, do silício total.

CAPÍTULO 9

COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Isótopos são espécies de um mesmo elemento químico que possuem igual número de prótons e diferente número de massas. São chamados de estáveis quando não alteram a sua massa ao longo de sua existência e radioativos ou instáveis quando decaem por emissão de energia ou partículas subatômicas. O uso dos isótopos estáveis em estudos hidrogeológicos é baseado no fato de que as diversas fases do ciclo hidrológico registram variações nas composições isotópicas de maneira previsível.

A diferença no número de massa influencia na abundância dos isótopos. Os isótopos com menor massa atômica (mais leves) tendem a ser mais abundantes, enquanto os isótopos com massa atômica maior (mais pesados) são mais raros. A partir disso, surge o conceito de composição isotópica (R) que é a relação entre o isótopo pesado e o mais leve:

$$R = \frac{\text{Raro}}{\text{Abundante}} = \frac{\text{pesado}}{\text{leve}}$$

O resultado das análises isotópicas são dados em comparação a um padrão de referência onde espera-se que os desvios na composição isotópica em relação ao padrão sejam mínimos, tipicamente, entre 0,1‰ para o oxigênio e carbono e 1‰ para o hidrogênio (ALBAREDE, 2011). A notação delta (δ) é usada para apresentar as razões de isótopos estáveis em relação a um padrão de referência, sendo expressa em partes por mil (‰) segundo a seguinte equação:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \right) \times 10^3$$

A partir desta equação identificamos que:

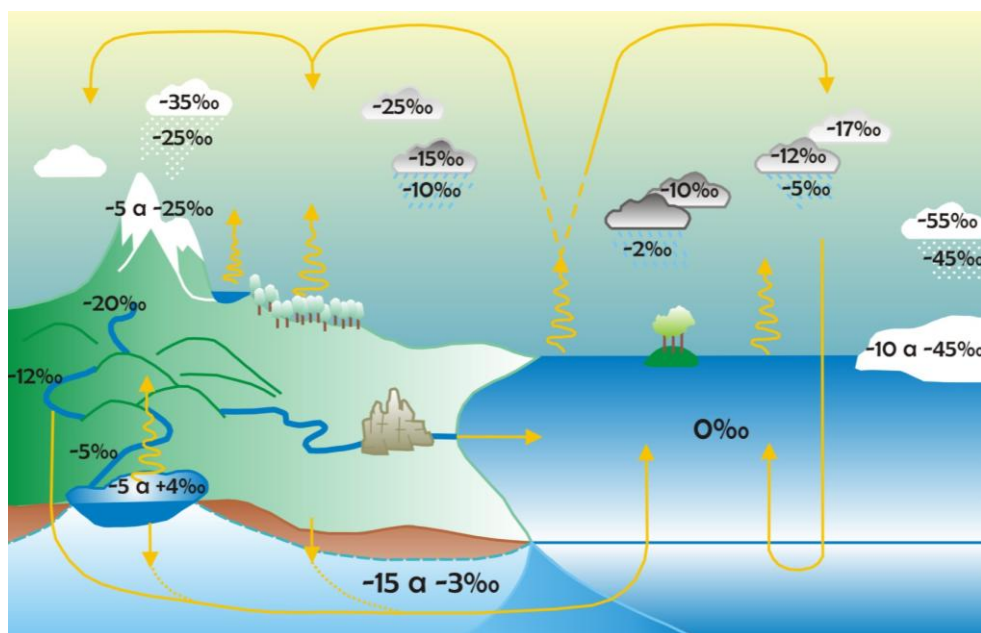
- Para valores positivos de δ , a amostra está enriquecida em isótopos menos abundantes em relação a referência;
- Para valores negativos de δ , a amostra está empobrecida em isótopos menos abundantes em relação a referência.

Se as águas pluviais infiltrassem imediatamente no solo para recarregar os aquíferos, estes apresentariam uma composição isotópica idêntica a média anual da composição da precipitação que a originou. No entanto, diversos fatores podem influenciar nessas composições, dentre eles a evaporação da água que ocorre desde a precipitação até o seu deslocamento em profundidade, mistura com águas de origem não meteórica, influência de águas fósseis, trocas isotópicas entre a água e substâncias químicas dos aquíferos (SALATI et al., 1971).

Quando a área de recarga está exposta a evaporação, importantes desvios são encontrados entre as composições da água da chuva e da água subterrânea, principalmente, em regiões mais áridas (FONTES, 2008). Segundo Clark e Fritz (1954), águas subterrâneas de aquíferos confinados são mais empobrecidas em isótopos pesados do que águas originadas em aquíferos livres com idade recente.

O fracionamento isotópico ocorre quando existem variações na proporção entre os isótopos estáveis em um determinado composto ao passar por um processo físico-químico (CLARK e FRITZ, 1954), onde uma das fases ficará isotopicamente mais leve, enquanto a outra ficará isotopicamente mais pesada. Na Figura 9.1 é possível observar os efeitos do fracionamento para o isótopo de ^{18}O no ciclo hidrológico.

Figura 9.1: Efeito do fracionamento isotópico para o ^{18}O em reservatórios de água.



Fonte: GAT, 1996 in BARBOSA 2009.

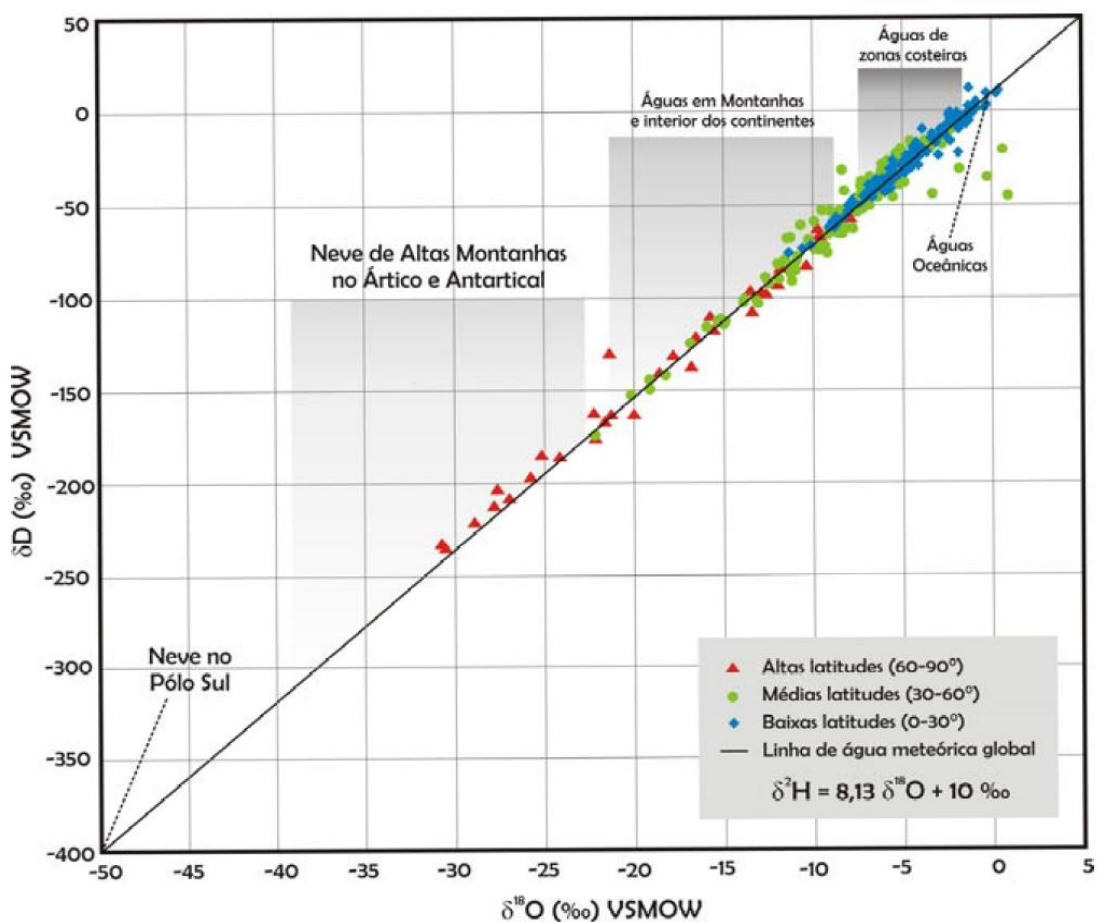
Craig (1961) observou a relação existente entre o ^{18}O e o D e com isso determinou a seguinte equação para a reta meteórica global:

$$\delta\text{D} = 8,13\delta^{18}\text{O} + 10 (\text{‰})$$

A Linha Meteórica Global (LMG) (Figura 9.2) corresponde a uma média de diversas linhas de águas meteóricas locais ou regionais, as quais diferem por variações climáticas e parâmetros geográficos.

Quando um corpo de água sofre evaporação a inclinação da reta é alterada, passando a ser menor que 8, pois a evaporação afeta menos o deutério e mais o oxigênio. Assim, inclinações menores que 8 identificam linhas de evaporação (CLARK e FRITZ, 1954).

Figura 9.2: Linha meteórica global (LMG).



Fonte: Modificado de ROZANSKI et al. 1993 in BARBOSA 2009.

O parâmetro d , excesso de deutério, definido por Dansgaard (1964) é calculado através da equação:

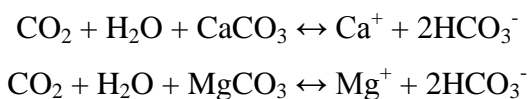
$$d = \delta D - \delta^{18}O$$

O seu valor reflete o fracionamento cinético que ocorre durante processos de não equilíbrio como a evaporação sobre a superfície do oceano (MERLIVAT e JOUZEL, 1979), evaporação (STEWART, 1975) e formação da chuva abaixo da base das nuvens (JOUZEL e MERLIVAT, 1984). Esses valores também fornecem informações sobre condições meteorológicas e distância das fontes evaporativas que deram origem as chuvas (ARMENGAUD, 1998). MARTINELLI et al., (2009) afirma que valores de excesso de deutério maiores que 10 indicariam a presença de uma água que passou por sucessivos processos de evaporação. Já os valores pequenos ou negativos indicam água meteórica parcialmente evaporada (COSTA et al., 2007).

9.1 ORIGEM DOS CARBONATOS DISSOLVIDOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

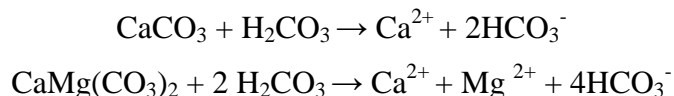
As reações de dissolução dos carbonatos estão intimamente relacionadas com a quantidade de CO_2 presente na água (SANTOS, 2008). A transferência de carbono entre atmosfera e biosfera terrestre ocorre, essencialmente, por meio de dois processos: fotossíntese e respiração. O carbono assimilado pela fotossíntese é liberado como CO_2 durante a respiração e decomposição (MARTINELLI et al., 2009).

A água da chuva, naturalmente, contém CO_2 dissolvido e ao infiltrar no solo se enriquece ainda mais em CO_2 , a reação com os carbonatos ocorre segundo as equações:

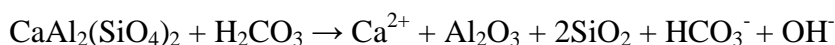


Segundo Spencer e Telmer (2005) *in* Santos (2008) a concentração dos carbonatos dissolvidos nas águas subterrâneas depende dos mecanismos de intemperismo químico com os ácidos carbônico (H_2CO_3) e sulfúrico (H_2SO_4). Quando uma água subterrânea interage com

carbonatos (calcita ou dolomita), o intemperismo de carbonatos, por ácido carbônico é expresso pelas reações:



Assim, quanto mais CaCO_3 for dissolvido maior será a concentração de carbonato total dissolvido na água. Para minerais silicatados o intemperismo por ácido carbônico ocorrerá segundo a reação:



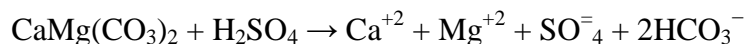
O que contribui para o aumento da concentração de carbonato total dissolvido na água. Minerais de sulfeto ocorrem disseminados em rochas sedimentares e ígneas, sendo o mais comum a pirita (FeS_2). Esse mineral na presença de oxigênio e de água, forma o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e óxidos metálicos conforme a reação:



O ácido sulfúrico derivado pode participar das reações:



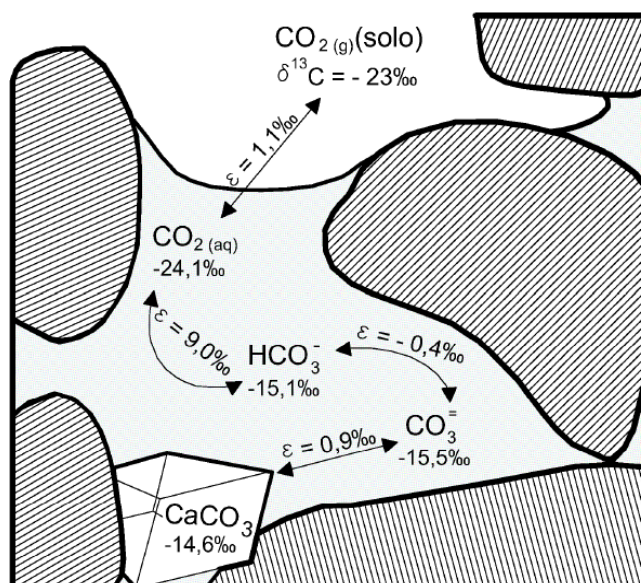
e



Contrário ao que ocorre no intemperismo químico com ácido carbônico, nenhum CO_2 atmosférico é consumido pelo intemperismo baseado no ácido sulfúrico. Além das reações descritas, podem ocorrer eventos em que os dois ácidos, carbônico e sulfúrico, estejam atuando conjuntamente.

Para avaliar a contribuição da fonte de carbono na água subterrânea é preciso conhecer identificar a relação de equilíbrio isotópico a partir do fator de fracionamento. A Figura 9.3 mostra como varia o ^{13}C devido a fontes de carbono e ao fator de fracionamento entre as espécies. Conforme a água infiltra, dissolve CO_2 e CaCO_3 (carbonato de cálcio), e posteriormente dissocia-se nos íons HCO_3^- (bicarbonato), CO_3^{-2} (carbonato), sendo que a distribuição dessas espécies do carbono inorgânico dissolvido (CID) é controlada pelo pH. Desta forma, diferentes fatores de fracionamento existem entre cada espécie aquosa e o gás do solo (SANTOS, 2008).

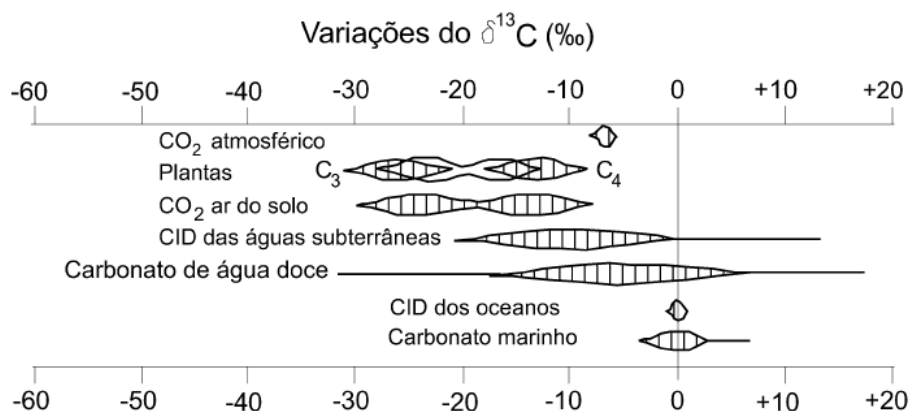
Figura 9.3: Esquema de fracionamento isotópico do ^{13}C durante mudança de equilíbrio do carbono entre o CO_2 , CID e a calcita a 25°C .



Fonte: Modificado de Clark e Fritz, 1954 in Santos, 2008.

A presença do Carbono Inorgânico Dissolvido (CID) nos ambientes aquáticos está relacionada com as fontes de carbono existentes neste ambiente, tais como: CO_2 do solo, CO_2 atmosférico e dissolução de carbonatos. Na Figura 9.4 é apresentada a faixa de valores do CID encontrados no meio ambiente de acordo com Mook e Vries (2001). As variações nos valores de pH tendem a influenciar no CID, pois as reações de equilíbrio do sistema de carbonatos são dependentes das concentrações de H^+ (ESTEVES, 1998).

Figura 9.4: Faixa de valores do $\delta^{13}\text{C}$ de compostos e materiais encontrados na natureza.



Fonte: MOOK e VRIES, 2001.

A faixa de valores do $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ das amostras analisadas é correspondente, de acordo com Mook e Vries (2001), a águas subterrâneas com presença e/ou influência de carbonatos de águas doce, CO_2 do solo e plantas do tipo C3 e C4.

As plantas podem ser divididas em três grandes grupos de acordo com o seu metabolismo fotossintético: C3, C4 e CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*). Os diferentes tipos de fotossíntese apresentam grandes diferenças no grau de fracionamento.

As plantas ao absorver CO_2 da atmosfera discriminam átomos de ^{13}C , portanto, terão mais átomos de ^{12}C que o ar atmosférico. As plantas que seguem o ciclo fotossintético C3 fazem essa discriminação isotópica diferentemente das plantas que seguem o ciclo fotossintético C4 e CAM. Assim sendo, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ desses tipos de plantas são distintos.

Plantas C3 resultam num $\delta^{13}\text{C}$ variando de -24‰ a -38‰ . Em contrapartida, nas plantas C4 são verificados valores entre -11‰ a -15‰ (MARTINELLI et al., 2009).

As Plantas tipo C3 são aquelas em que o produto resultante da carboxilação (etapa bioquímica da fotossíntese) é um composto de com 3 carbonos, 3-fosfoglicerato ou glicerato 3-fosfato. Possuem somente a enzima Rubisco, pertencente ao Ciclo de Calvin, como alternativa para a fixação do carbono.

De acordo com Martinelli et al. (2009) os modelos de fracionamento isotópico durante a fotossíntese consideram que a discriminação dos átomos de ^{13}C ocorre em duas etapas:

- (a) Durante a difusão do CO_2 pelos estômatos, conhecido pelo valor a , que é estimado em $4,4\text{‰}$; e
- (b) Durante a fixação do CO_2 atmosférico em um composto orgânico, por meio da reação de carboxilização, conhecido como valor b , estimado em cerca de 30‰ .

Existe ainda um terceiro parâmetro que interfere de modo concreto na composição isotópica das plantas: a relação entre a pressão interna de CO_2 na câmara estomatal (p_i) e a pressão externa da atmosfera (p_a). A equação que expressa essas relações é:

$$\left(\frac{p_i}{p_a} \right)$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{planta-C3}} = \delta^{13}\text{CO}_2 - a - (b - a)$$

As plantas C4 são assim chamadas devido ao fato do ácido oxalacético possuir 4 moléculas de carbono, formado após o processo de fixação de carbono. Existe uma menor discriminação isotópica dos átomos de ^{13}C pelas plantas do tipo C4 em relação as plantas do tipo C3. E a razão está no modo como o CO_2 é fixado nessas plantas durante a fotossíntese. Este fracionamento ocorre em três fases distintas:

- (a) Durante a difusão do CO_2 atmosférico pelo estômato, como nas plantas C3; logo, o valor a é o mesmo, em torno de 4‰;
- (b) Durante a passagem do CO_2 para HCO_3^- .
- (c) Durante a carboxilação do HCO_3^- .

As plantas crassuláceas (CAM) sintetizam oxaloacetato a partir do CO_2 atmosférico, usando a PEP carboxilase. À noite, essas plantas fecham seus estômatos e fazem o processo inverso, transformando o malato em CO_2 e fixando-o, como as plantas C3 o fazem. Como todo o CO_2 é fixado, não haverá fracionamento nessa fase. Para ser produzido, o malato resulta em um fracionamento semelhante ao das plantas C4.

9.2 RESULTADOS DOS VALORES ISOTÓPICOS

Os valores isotópicos obtidos nesse trabalho, apresentados na Tabela 9.1, variaram de -2,1‰ a 0,4‰ para o oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$) com valor médio de -0,9‰. O deutério (δD) variou de -17,0‰ a 0,0‰, com média de -9,3‰. Os valores isotópicos de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) variaram de -22,0‰ a -13,0‰, com média de -16,5‰.

Os valores negativos obtidos nas análises de δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ indicam que são águas empobrecidas em relação aos padrões VSMOW e PDB. As amostras C2 e C3 apresentam um maior enriquecimento isotópico do que as demais amostras para $\delta^{18}\text{O}$.

Tabela 9.1: Valores isotópicos de δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ e d .

Amostra	D1	D2	D3	D4	D5	D6	S1	C1	C2	C3	C4	C5	M1	M2	M3
δD (‰) ± 1 ‰	-1,11	-2,34	-7,24	-7,33	-10,85	-9,13	-16,41	-14,57	-17,00	-14,57	-13,01	-9,91	-0,17	-9,97	-5,83
$\delta^{18}O$ (‰) $\pm 0,1$ ‰	-1,93	-1,73	-1,90	-0,49	-0,43	-0,57	-1,14	-0,18	0,38	0,38	-0,34	-1,30	-0,51	-1,94	-2,13
$\delta^{13}C_{DIC}$ (‰) $\pm 0,1$ ‰	-15,66	-13,84	-14,54	-13,17	-14,90	-14,32	-18,11	-16,25	-16,40	-14,25	-15,32	-16,22	-21,09	-21,69	-21,99
d (‰) ± 1 ‰	14,33	11,50	7,96	-3,41	-7,41	-4,57	-7,29	-13,53	-20,04	-17,61	-10,29	0,49	3,91	5,55	11,21

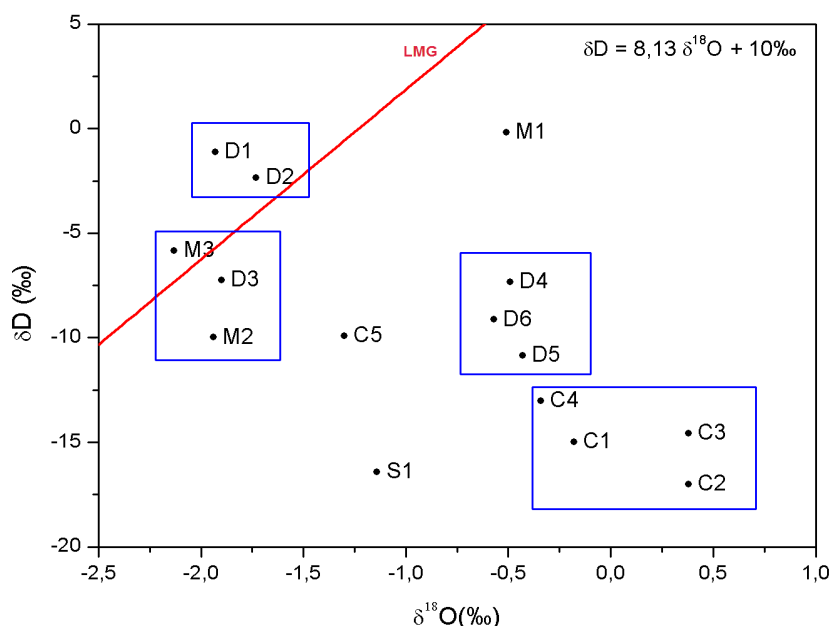
Os valores de excesso de deutério das amostras D1, D2 e M3 indicam a possibilidade de conter águas evaporadas com probabilidade de mistura. Já os valores próximos a zero e/ou negativos encontrados nas amostras D4, D5, D6, S1, C1, C2, C3, C4, C5 são características de águas parcialmente evaporadas. Quanto mais negativa a amostra, mais próximo da fonte estará.

A Figura 9.5 ilustra a Linha Meteórica Global (LMG), uma relação entre o oxigênio e o deutério ($\delta^{18}O$ x δD). A análise desta figura permite verificar que existe variação no coeficiente angular da reta obtida para os dados da área de trabalho em relação a LMG, circunstância que indica que as águas sofreram processo de evaporação durante a infiltração.

As amostras localizadas abaixo da LMG correspondem a águas mais antigas ou localizadas em porções semi-confinadas do aquífero, não existindo contato direto com águas meteóricas e é possível afirmar que passaram por processos evaporativos. As amostras M3, D1, D2 e D3 correspondem a águas com composição isotópica próxima as das águas meteóricas. Os agrupamentos de amostras destacados pelo círculo azul no gráfico indicam grupos de águas com características próximas.

A partir da análise da Figura 9.5 pode-se sugerir que as amostras D1, D2, D3 e M3 correspondem a águas de um aquífero livre, no caso pertenceria ao membro Rio Joanes. Enquanto as amostras D4, D5, D6, S1, C1, C2, C3, C4 pertencem a um aquífero semi-confinado, podendo fazer parte do membro Passagem dos Teixeiras ou Paciência.

Figura 9.5: Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ x δD das amostras de água coletadas em comparação com a LMG das amostras de água de precipitação de várias partes do mundo (Rozanski et al., 1993).



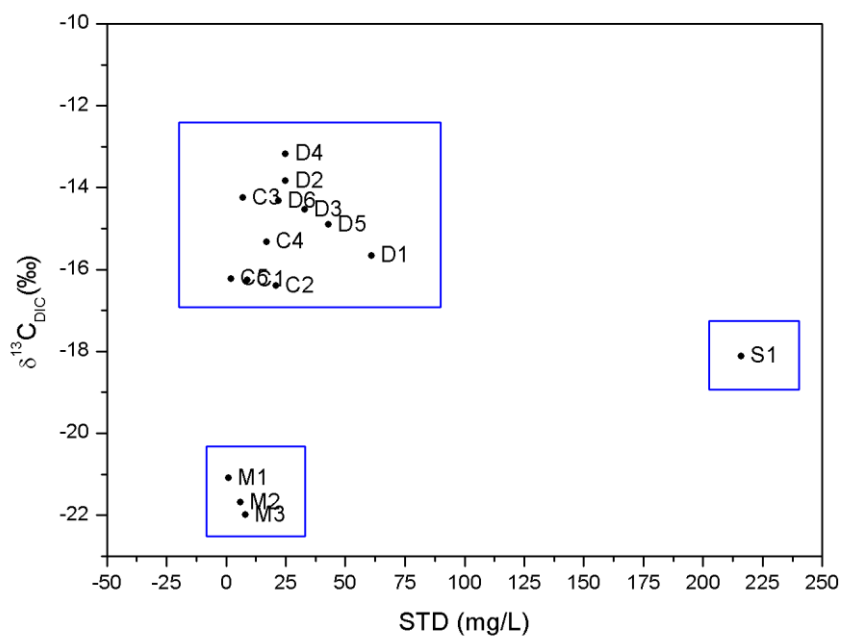
Fonte: A Autora.

A Figura 9.6 ilustra a distribuição dos dados de sólidos totais dissolvidos x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Como o ponto S1 se distancia dos demais, foi feito o mesmo gráfico mas, sem o ponto em questão (Figura 9.7) para que fosse possível observar melhor o comportamento dos dados.

Sabe-se que o CO_2 presente no ar do solo tem como fonte a respiração e a decomposição das plantas e, conseqüentemente, desempenha um importante papel na formação dos carbonatos dissolvidos nas águas subterrâneas. Os sólidos totais dissolvidos representam a concentração de todo o material dissolvido na água resultante da interação química entre os minerais constituintes das rochas e a água subterrânea. Sendo assim, esta interação resulta em um aumento do conteúdo de STD. Ao observar os gráficos das Figuras 9.6 e 9.7 nota-se que não existe nenhuma relação linear entre os sólidos totais dissolvidos e o $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Sendo assim, pode-se afirmar que a presença do STD não está relacionada com o $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.

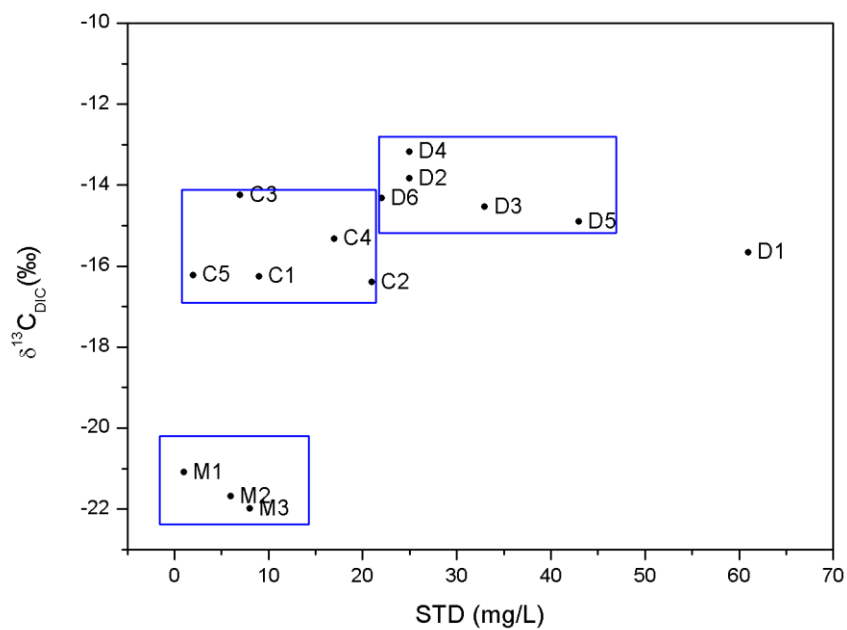
As amostras M1, M2 e M3 representam águas meteóricas com separação isotópica por DIC. As demais amostras demonstram características próximas agrupando-se no gráfico o que demonstra mistura entre as águas.

Figura 9.6: Gráfico Sólidos totais dissolvidos x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



Fonte A Autora.

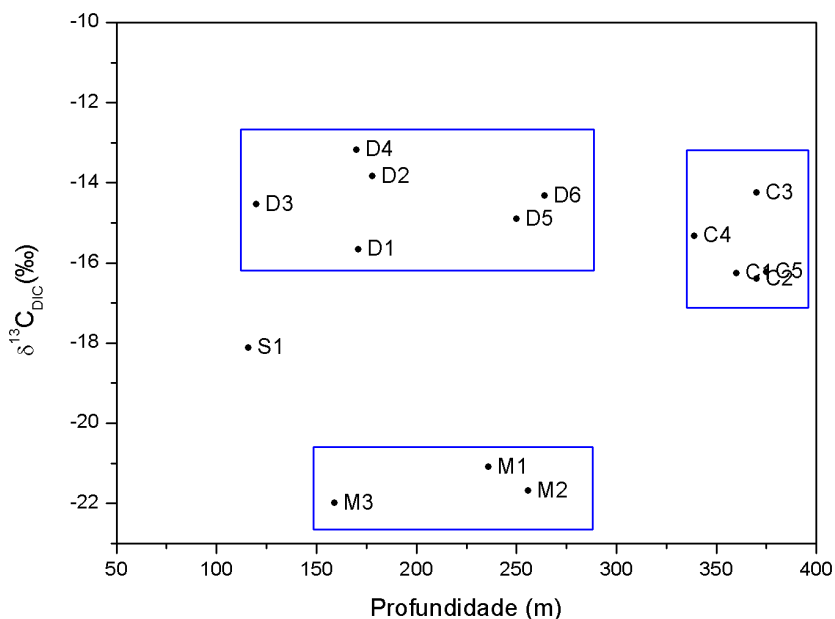
Figura 9.7: Gráfico Sólidos totais dissolvidos x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, sem o ponto S1.



Fonte: A Autora.

Na Figura 9.8 é apresentada a distribuição dos dados de profundidade x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Apesar da presença de níveis com lentes de calcário e matéria orgânica, principalmente, entre os membros Paciência (inferior) e Passagem dos Teixeira (médio), não foi observado variações que indiquem relações direitas entre a profundidade dos poços e o teor de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.

Figura 9.8: Gráfico Profundidade x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



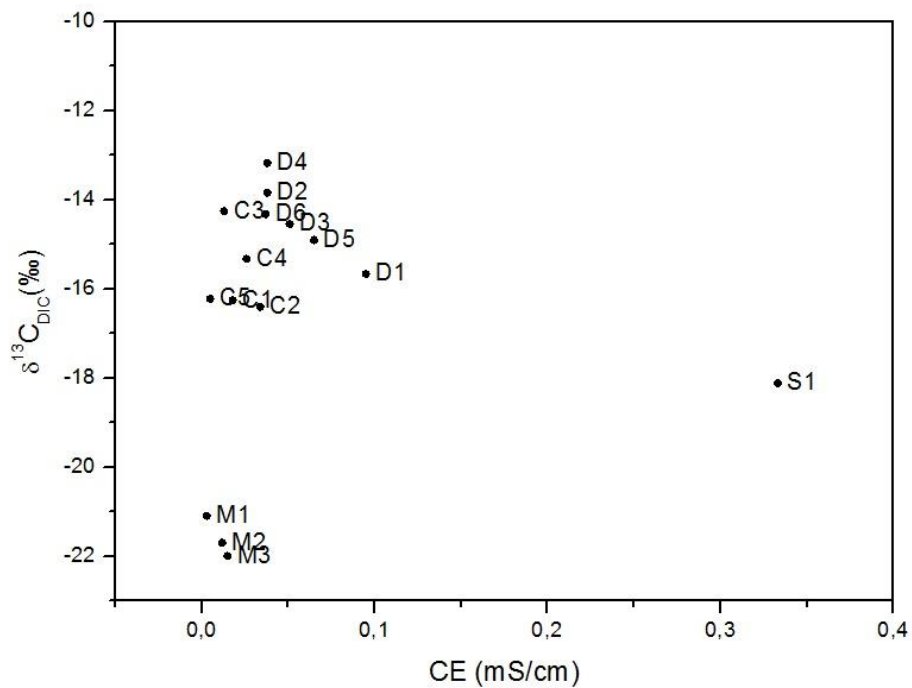
Fonte: Autora.

Na Figura 9.9 está representada a distribuição dos dados de condutividade elétrica x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Como o ponto S1 se separa do grupo, foi desenvolvido o mesmo gráfico, mas, sem o ponto em questão (Figura 9.10) para que fosse possível observar melhor o comportamento dos dados.

Considerando que condutividade elétrica é uma medida que define a facilidade com que a água conduz a corrente elétrica e está relacionada com o teor de sais dissolvidos e o $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ é um parâmetro que avalia o grau de interação água-rocha correlatado ao material em solução, pode-se supor, ao observar as Figuras 9.9 e 9.10, que estes parâmetros não apresentam correlações lineares entre si.

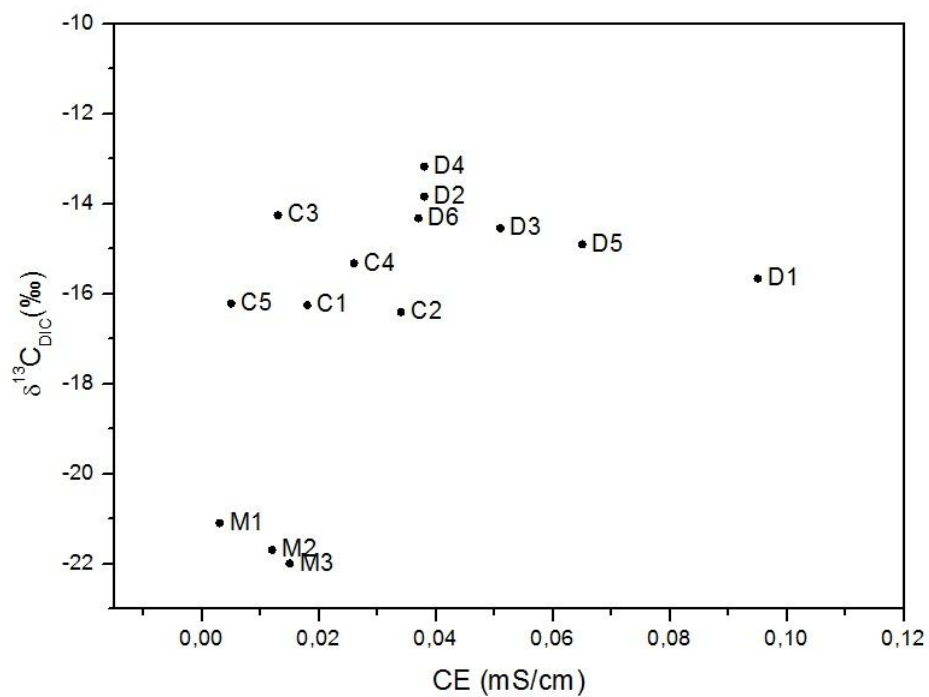
Nota-se que os gráficos das Figuras 9.6 e 9.7 apresentam comportamento similar aos das Figuras 9.9 e 9.10.

Figura 9.9: Gráfico condutividade elétrica x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



Fonte: Autora.

Figura 9.10: Gráfico condutividade elétrica x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, sem o ponto S1.

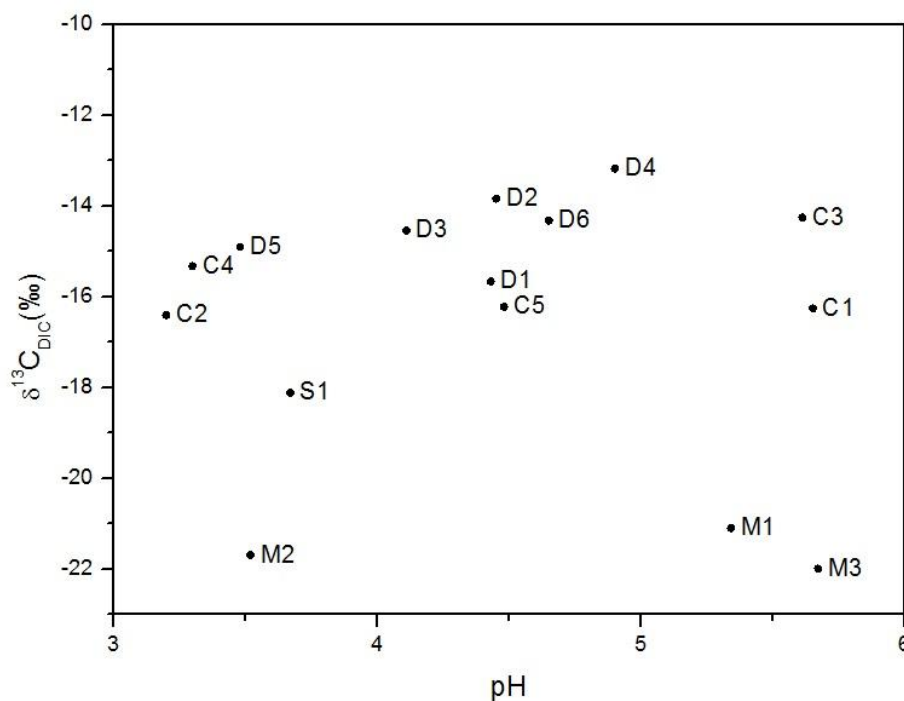


Fonte: A Autora.

Na Figura 9.11 está representada a distribuição dos dados de pH x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. As variações observadas podem ser explicadas através do intemperismo que, possivelmente, atuam no aquífero. Os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ entre -22,0‰ a -13,2‰ indicam a probabilidade de ocorrência de intemperismo químico por ação do ácido carbônico (H_2CO_3).

Segundo Spencer e Telmer (2005) a concentração dos carbonatos dissolvidos nas águas subterrâneas depende dos mecanismos de intemperismo químico que ocorrem. Quando uma água subterrânea interage com carbonatos (calcita ou dolomita identificados na análise dos índices de saturação) na presença do H_2CO_3 haverá uma reação formando bicarbonato, carbonato.

Figura 9.11: Gráfico pH x $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$.



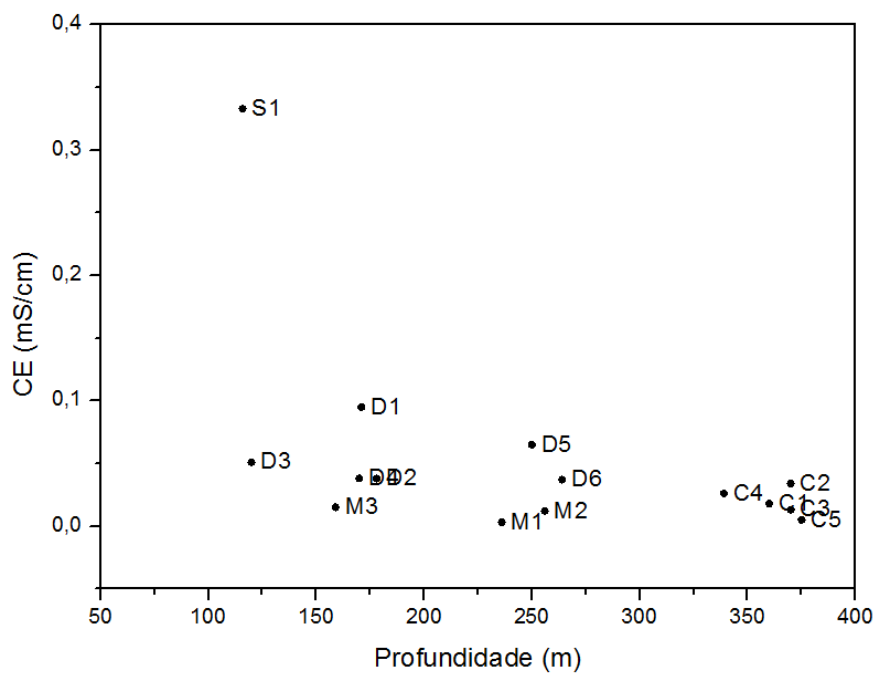
Fonte: A Autora.

Na Figura 9.12 está representada a distribuição dos dados de profundidade x condutividade elétrica. Como o ponto S1 se afasta dos demais, foi desenvolvido um gráfico sem o ponto em questão (Figura 9.13) para observar melhor o comportamento dos dados.

Ao contemplar essas Figuras (9.12 e 9.13) é possível notar que não existe relação direta entre os parâmetros. Isso pode ser decorrente da mineralogia, predominantemente, quartzosa que compõe a litologia da área. Sendo o quartzo um mineral de alta estabilidade e baixa

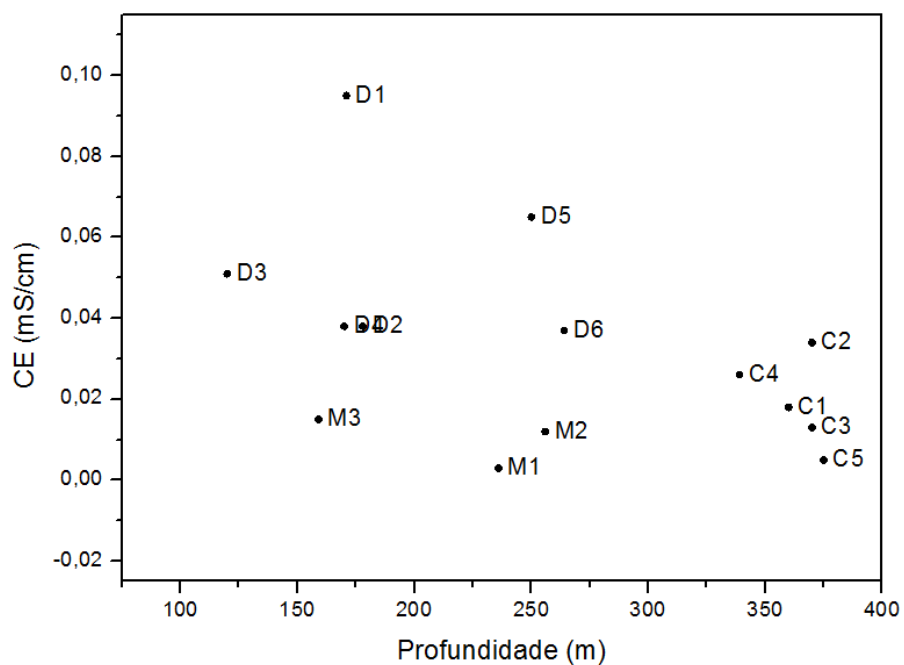
solubilidade, as condições de intemperismo e o tempo de permanência da água não foram suficientes para demonstrar uma relação direta de interação.

Figura 9.12: Gráfico profundidade x condutividade elétrica.



Fonte: A Autora.

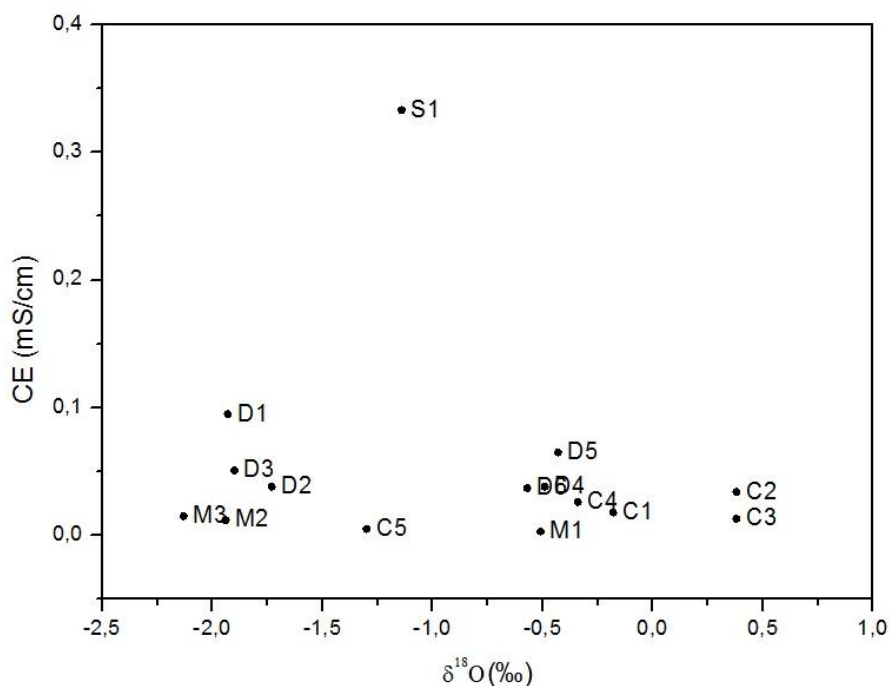
Figura 9.13: Gráfico profundidade x condutividade, sem o ponto S1.



Fonte: A Autora.

A dependência da salinidade com a evaporação pode ser avaliada através da correlação com os dados isotópicos. Com isso desenvolveu-se a Figura 9.14 que ilustra a distribuição dos dados de $\delta^{18}\text{O}$ x condutividade elétrica. Nesta figura não observa-se relação linear entre a condutividade elétrica e o $\delta^{18}\text{O}$. Portanto, não verificou-se relação dessas águas com processo evaporativo e salinização.

Figura 9.14: Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ x condutividade elétrica.

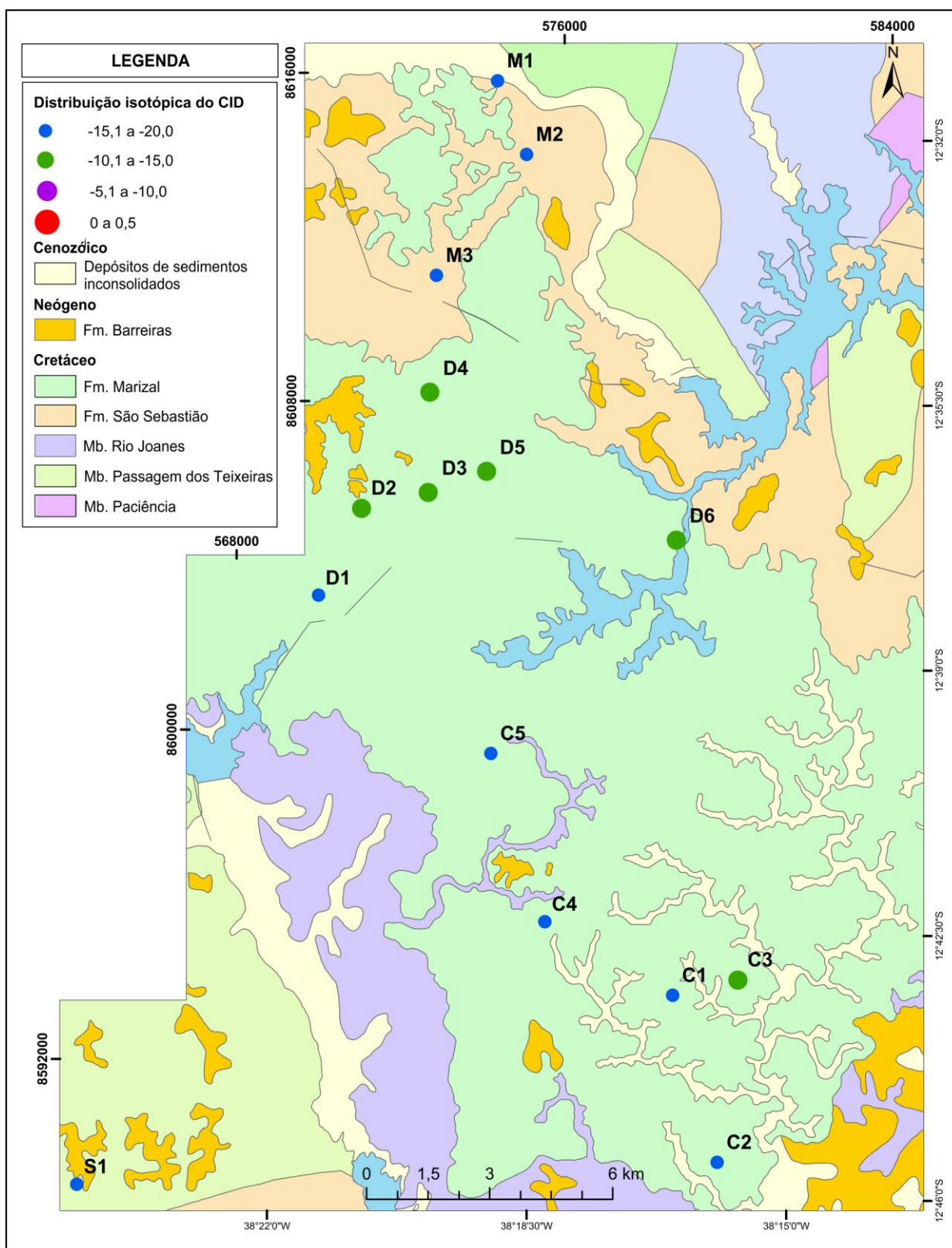


Fonte: A Autora.

Nas Figuras 9.15 a 9.18 são apresentados mapas de distribuição isotópica dos parâmetros CID, deutério, oxigênio-18 e excesso de deutério, respectivamente.

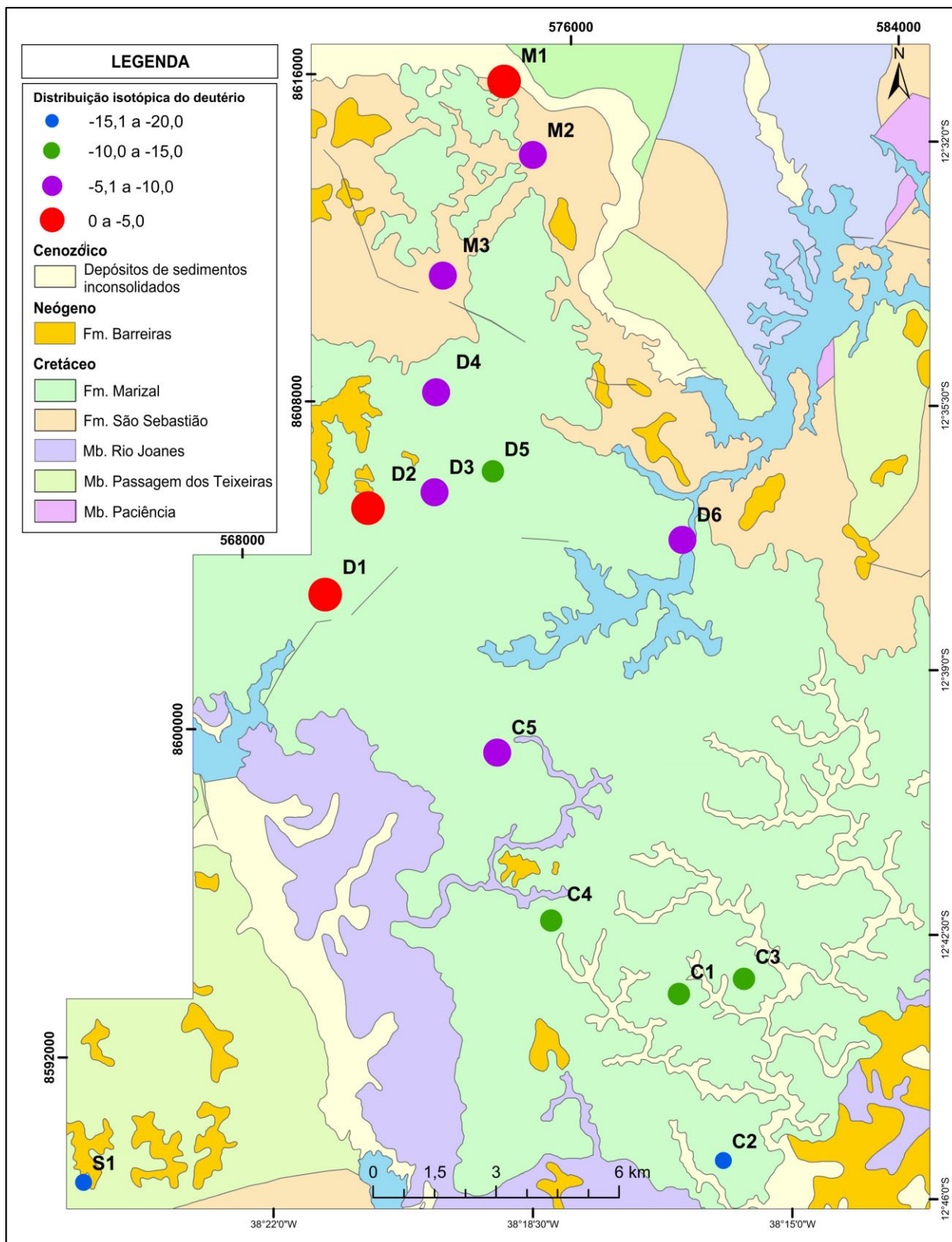
Nota-se nas Figuras 9.16 e 9.18 que na porção sudoeste as amostras apresentam-se mais empobrecidas com uma evolução para valores mais enriquecidos a medida que adentra o continente. Demonstrando o enriquecimento isotópico gradual desses parâmetros.

Figura 9.15: Distribuição isotópica do CID.



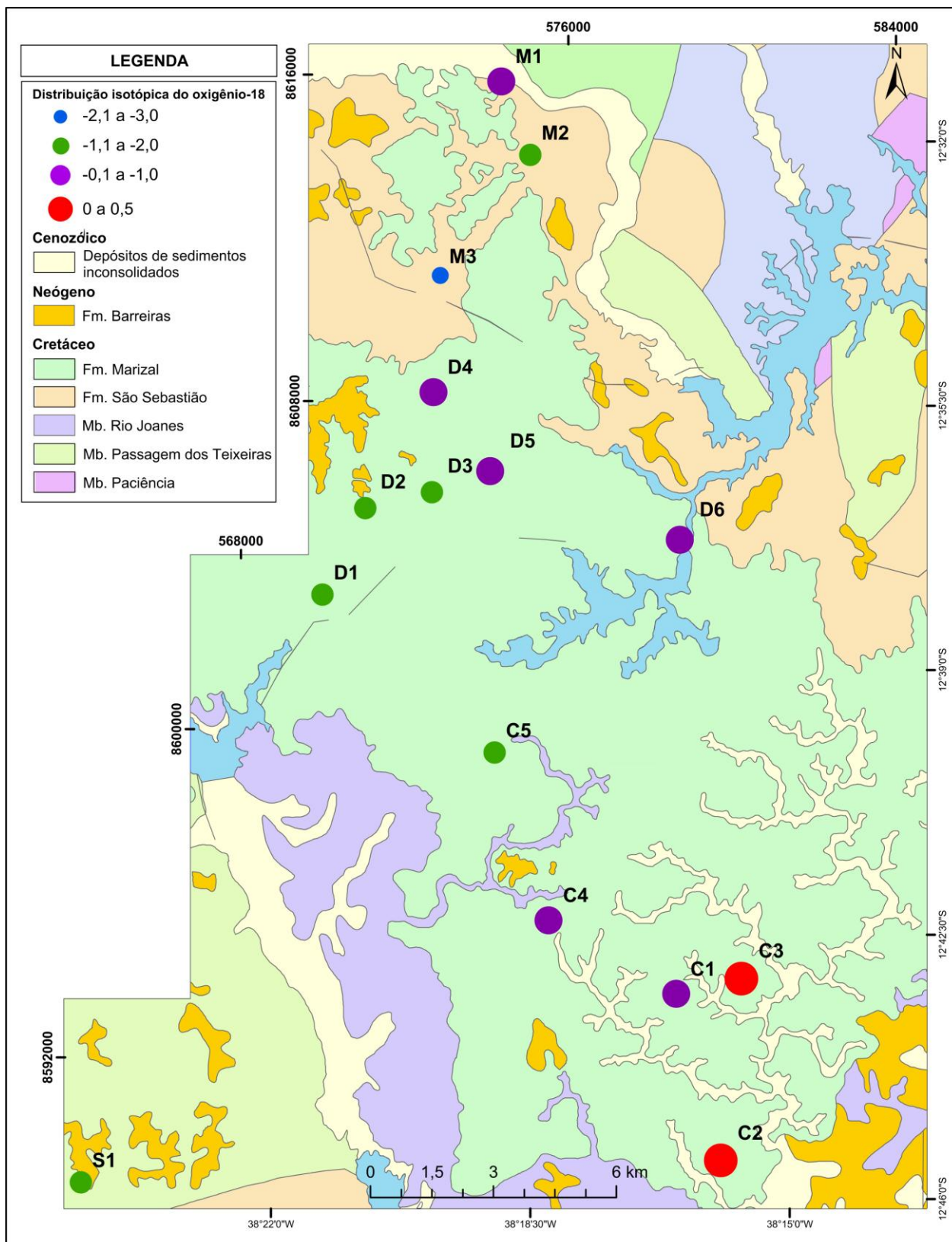
Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

Figura 9.16: Distribuição isotópica do deutério.



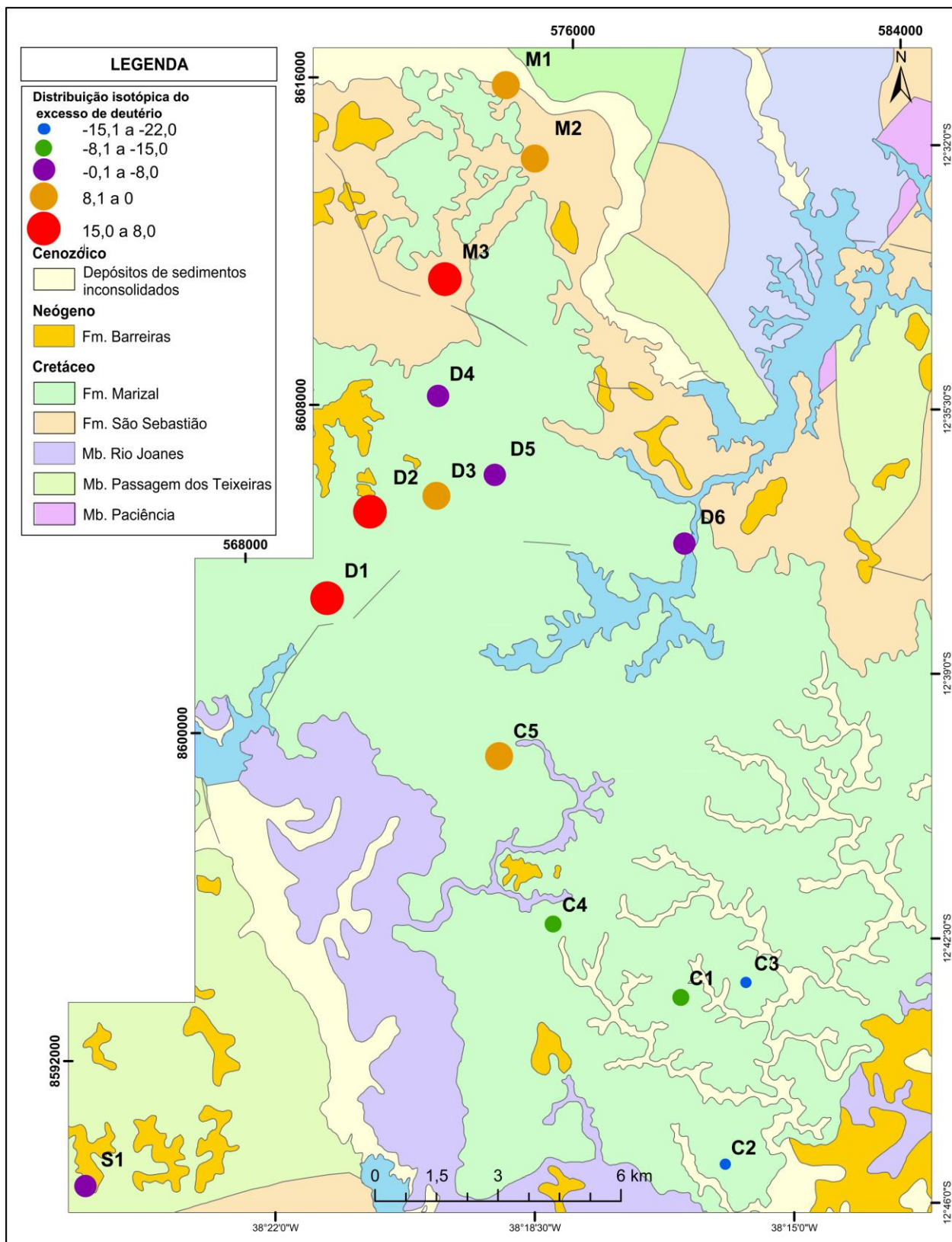
Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

Figura 9.17: Distribuição isotópica do oxigênio-18.



Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

Figura 9.18: Distribuição isotópica do excesso de deutério.



Fonte: CPRM, 2004 (modificado).

Costa et al. (2007) em estudos recentes na bacia do Rio Joanes, buscando identificar a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, identificou que as águas do aquífero São Sebastião apresentam marca isotópica diferente da água de precipitação com valores médios de $\delta D = 1,0\text{‰}$ e $\delta^{18}O = -2,2\text{‰}$. Os valores isotópicos encontrados pelo autor apresentam diferenças isotópicas significativas quando comparadas aos dados detectados nesta pesquisa, demonstrando que, possivelmente, houve alguma anomalia isotópica em algum período de recarga do aquífero ou a influência da variação sazonal nas recargas tendo em vista que a amostragem realizada por Costa et al. (2007) foi desenvolvida em um longo espaço de tempo, de 2003 a 2005, enquanto neste trabalho foi realizada uma única amostragem.

No aquífero Urucuia, oeste do Estado da Bahia, Barbosa (2009), buscando caracterizar o reservatório, identificou concentrações médias de $\delta D = -32,4\text{‰}$ e $\delta^{18}O = -4,6\text{‰}$ para as águas subterrâneas com isso, definiu que existem conexões entre as águas superficiais e subterrâneas facilitadas pelos fácies arenosos que constituem a litologia local. Na porção trabalhada do aquífero São Sebastião as médias variaram de $\delta D = -9,3\text{‰}$ e $\delta^{18}O = -0,9\text{‰}$ o que demonstra uma grande diferenciação entre estes aquíferos explicada pelo efeito da continentalidade onde tem-se que as precipitações que ocorrem sobre o oceano tem a característica da primeira condensação de vapor e quanto mais para o interior do continente as precipitações tornam-se mais negativas.

Estudos isotópicos realizados no aquífero cárstico Salitre localizado na região de Irecê - BA, permitiram identificar a origem da salinização das águas e os processos que estão envolvidos na dissolução dos carbonatos. Santos (2008) identificou valores médios correspondentes a $\delta D = -27,0\text{‰}$, $\delta^{18}O = -3,7\text{‰}$ e $\delta^{13}C_{CID} = -6,6\text{‰}$ em sua primeira campanha de amostragem e $\delta D = -32,0\text{‰}$, $\delta^{18}O = -4,5\text{‰}$ e $\delta^{13}C_{CID} = -11,2\text{‰}$ na segunda campanha de coleta e análises. Assim, nota-se que a porção do aquífero São Sebastião estudada neste trabalho não apresenta nenhuma característica correlata a outros aquíferos importantes do Estado da Bahia mais uma vez em decorrência do efeito da continentalidade.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES

As águas subterrâneas do aquífero São Sebastião apresentam características hidroquímicas típicas de águas com baixo grau de mineralização. De acordo com o Diagrama Triangular de Piper, foram classificadas como águas cloretadas sódicas (53% das amostras), águas bicarbonatadas sódicas (14% das amostras), águas cloretadas mistas (14% das amostras), subordinadamente, ocorrem águas bicarbonatadas mistas (7% das amostras), águas cloretadas cálcicas (4% das amostras), águas bicarbonatadas cálcicas (4% das amostras) e águas mistas-mistas (4% das amostras).

Observando o diagrama nota-se que existe um crescimento no teor de cálcio (Ca^{2+}) entre as amostras S1 < C10 e de carbonatos e bicarbonatos nas amostras C8 < C11 < C14 < C10 caracterizando um aumento gradativo de teores destes elementos, possivelmente, decorrente da dissolução dos minerais de composição carbonática. Nota-se, também, a existência de águas misturadas (campo “mistas” do diagrama), elevação dos teores de sódio e potássio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) entre as amostras C6 < D2 < D1, provavelmente, em decorrência da dissolução ou trocas iônicas com as argilas. Além do aumento gradativo no teor de cloreto entre as amostras D2 < D1 < C6 como resultado, presumivelmente, da influência de áreas que possibilitam recargas.

Todas as águas foram classificadas como doce em relação aos sólidos totais dissolvidos.

A maioria dos íons apresenta valores dentro do limite de potabilidade segundo a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde e a Resolução CONAMA nº 396, com exceção do ferro total (valor limite até 0,3 mg/L), que precipita-se sob a forma de FeO(OH) , Fe_2O_3 e Fe(OH)_3 , devido as características de pH, Eh, índice de saturação e atividade iônica.

De acordo com o Artigo 3º da Resolução CONAMA nº 396, estas águas podem ser enquadradas na Classe 2 de qualidade das águas subterrâneas.

Todas as águas são de boa qualidade para irrigação. No entanto a amostra S1 destacou-se, sendo classificada como C2-S1 e está localizada, provavelmente, no membro Passagem dos Teixeiras. Com o tempo essas águas podem causar alguma salinização nos argilossolos dessa região.

Na avaliação da qualidade das águas para indústria, sua adequação variou em função da atividade industrial. Os principais parâmetros que causam inadequação foram o ferro, pH, alcalinidade, cloreto, cálcio. No entanto, técnicas modernas de tratamento de água permitem, na maioria das vezes, que águas de diferentes composições sejam utilizadas para qualquer uso industrial.

Foram identificados dois fácies hidroquímicos principais caracterizados pelos cátions bicarbonato e cloreto. Observou-se a predominância da relação iônica do tipo $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$ associada aos ânions $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$, consequência da influência das águas meteóricas.

A análise do sumário estatístico mostrou que os valores das assimetrias de quase todos os parâmetros estavam acima do valor crítico estabelecido, com exceção dos valores de pH e isótopos. A correlação de Spearman identificou que o Mg^{2+} tem forte correlação com o Si^{4+} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e SO_4^{2-} e o Ca^{2+} demonstra correlação com SO_4^{2-} , HCO_3^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ e Si^{4+} . A leve salinização expressa pelo STD e CE com SO_4^{2-} , HCO_3^- e Na^+ .

A análise da variância (ANOVA) identificou que existem diferenças estatísticas significativas entre os membros da Formação São Sebastião considerando os parâmetros Ca^{2+} e Mg^{2+} a um nível de significância de 0,05. Apesar disso, foi impossível agrupar os poços estudados em cada um dos membros da Formação São Sebastião.

O teste de Tukey identificou diferença entre o membro Passagem Teixeira e o membro Paciência com relação ao magnésio, enquanto o cálcio, mostrou que existe diferença entre o membro Passagem dos Teixeiras com o membro Rio Joanes e Paciência. Essa diferenciação pode estar associada as trocas de base entre os níveis argilosa (folhelhos) e a água subterrânea. Esses níveis de folhellhos são mais frequentes no membro Passagem dos Teixeiras.

O índice de saturação para cálcio apresentou valores entre - 20,74 e 3,44, podendo haver, nos poços C4 e S1, a precipitação dos minerais aragonita, calcita e dolomita. Para o

magnésio os valores de IS encontrados estão entre - 69,11 e 25,52, podendo haver precipitação de fases minerais de clorita, crisotila, sepiolita, sepiolita (d) e talco nos poços C1, C2, C3, C4, C5, C6, C11, D6, S1.

Na análise da composição isotópica das águas foi verificado que existe variação no coeficiente angular da reta obtida para os dados da área de trabalho em relação a LMG, circunstância que indica que as águas sofreram algum processo de evaporação durante a infiltração. Os grupos de amostras D1/D2/D3/M3 foram caracterizadas como de origem meteóricas com possibilidade de mistura e D4/D5/D6/C1/C2/C3/C4/S1 foram caracterizadas como águas mais antigas ou localizadas em porções semi-confinadas do aquífero que passaram por processos evaporativos, não existindo contato direto com águas meteóricas. Assim, acredita-se que as amostras D1/D2/D3/M3 fazem parte de aquífero livre, correspondendo ao membro Rio Joanes e as amostras D4/D5/D6/C1/C2/C3/C4/S1 pertencem aos membros Passagem dos Teixeiras ou Paciência.

Observou-se que não existem relações lineares bem definidas entre $\delta^{18}\text{O}$ e a condutividade elétrica. Portanto, não verificou-se relação dessas águas com processo evaporativo e salinização, talvez por tratar-se de uma região de clima úmido e chuvoso.

Os dados físicos levantados nesse estudo foram insuficientes para uma precisa separação entre os três membros da Formação São Sebastião. Essa dificuldade está associada a grande mistura de águas a partir de diversos horizontes produtores. O desenvolvimento e o acabamento (complementação) final dos poços durante e após a perfuração pode ser a principal causa da mistura das águas.

A ideia inicial de agrupar os poços tubulares em cada um dos membros da Formação São Sebastião em função do mapa geológico e de suas profundidades não foi determinante.

Para estudos futuros recomenda-se a análise isotópica conjunta de águas subterrâneas, superficiais e de precipitação visando uma modelagem isotópica mais detalhada para a caracterização das interações água – rocha – superfície.

REFERÊNCIAS

- ALBAREDE, F. *Geoquímica uma introdução*. São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- ALVARENGA, R. M. *Palavra de médico: Funções gerais dos minerais*. Disponível em: <<http://www.palavrademedico.com.br/tema06.htm>>. Acesso em 22 de março de 2015.
- ALVES, J.E.; *Aspecto Hidrogeoquímico do Ferro Total no Sistema Aquífero São Sebastião na Área do Polo Industrial de Camaçari – Bahia*. 48f. Trabalho Final de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA, 2012.
- ANA¹ – Agência Nacional das Águas. Atlas Brasil: *Abastecimento Urbano de Água: Panorama Nacional*. Brasília, 2010¹. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>>. Acesso em 22 de março de 2015.
- ANA² – Agência Nacional das Águas. Atlas Brasil: *Abastecimento Urbano de Água: Resultados por Estado*. Brasília, 2010². Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Home.aspx>>. Acesso em 22 de março de 2015.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standart Methods for the Examination of Water end Wastewater*. 19th Edition. Washington, D. C., 1995.
- ARMENGAUD, A., KOSTER, R., JOUZEL, J., CIAIS, P. (1998) *Deuterium excess in Greeland snow: analysis with simple and complex models*. Journal Geophysical Research, 103, 8947 – 8953.
- BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. *Mapa Geológico do Estado da Bahia: texto explicativo*. 1996.
- BARBOSA, N. S. *Hidrogeologia do sistema aquífero urucuia na região das bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, oeste do Estado da Bahia*. 98p. Dissertação (mestrado) – Pós Graduação em Geologia. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2009.
- BAHIA. *Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Salvador*. Secretaria do Planejamento Ciência e Tecnologia, Salvador: 1992.
- BERDEN, G.; ENGELN, R. “Cavity Ring-Down Spectroscopy – Techniques and Applications”. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- BONGIOLO, D. E.; SCHERER, C. M. S. *Estratigrafia de sequências e heterogeneidade dos Reservatórios flúvio-deltaicos da Formação São Sebastião, Bacia do Recôncavo*. In: 2º Congresso de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003.

- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução 396, de 3 de abril de 2008*. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, e dá outras providências. Brasília, 2008.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL *Folha SD.24 Salvador; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro, 1981.
- 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. Brasília, 2011.
- CAIXETA, J.M.; BUENO, G.V.; MAGNAVITA, L.V.; FEIJÓ, F.J. *Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n.1, p. 163-172, jan. / mar. 1994.
- CAVALCANTI, S. S. *Quantificação dos recursos hídricos subterrâneos do aquífero Recôncavo na bacia do rio Capivara*. 121 f. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2006.
- CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. *Depósitos de argila do Recôncavo Baiano: geologia e potencialidade econômica*. Valter Mônaco Conceição Filho; Marcos Donadello Moreira. Série Arquivos Abertos Volume 15, 2001.
- CLARK, I.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrology*. Lewis Press, New York, 1954.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Carta geológica do Brasil ao milionésimo*. Governo Federal do Brasil: 2004.
- COSTA, W.D. *Água subterrânea e o desenvolvimento sustentável do semi-árido nordestino*. In: Projeto ÁRIDAS. Brasília - DF: Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação da Presidência da República, 1994.
- COSTA, A.B.; AZEVEDO, A.E.G.; LEAL, L.R.B.; SANTOS, C.P.L.; ZUCCHI, M. R. *Avaliação do padrão da composição isotópica de águas na bacia do rio Joanes: implicações para a interação entre águas superficiais e subterrâneas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol 12 n 3, 211-219, Jul/Set, 2007.
- CRAIG, H. *Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters*. Science 133:1833-1834, 1961.

- DANSGAARD, W. *Stable isotopes in precipitation*. Tellus, 16:436-467, 1964.
- DELVIN T. M. *Manual de Bioquímica com correlações clínicas*. Editora Edgard Blucher Ltda, 1998.
- DRISCOLL, F.G. *Groundwater and Wells*. 2 ed. Minnesota: H.N.Smyth Comp. Inc., P.796-820, 1986.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Solos do Nordeste*. Disponível em: <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/>>. Acesso em 12 de maio de 2012.
- ESTEVES, A. F. *Fundamentos de limnologia*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 602, 1998.
- FEITOSA, F.A.C; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia conceitos e aplicações*. 2 ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE 2000.
- FEITOSA, F.A.C. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3ª ed. rev. e ampl. - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 391 p, 2008.
- FONTES, A. S. *Vulnerabilidade à salinização das águas superficiais da bacia do rio Jacuípe por meio de traçadores ambientais*. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2008.
- FONSECA, P. P. *Mapeamento Geológico e Zoneamento Geoambiental da região do Polo Industrial de Camaçari, através do Uso de Ortofotos Digitais*. Trabalho Final de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA., 2004.
- FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. *Guia do Usuário para Qualigraf*. FUNCEME/PROURB-RH. Fortaleza-Ceará, 2014.
- GHIGNONE, J. I. *Geologia dos sedimentos fanerozóicos do Estado da Bahia*. In: INDA, H.A.V. org. *Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: Textos Básicos*. Salvador: SME/CPM, v. 1. p. 23-117, 1979.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Manual técnico de Pedologia*, 2ª edição. Rio de Janeiro, 2007.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério da Fazenda. Secretaria de Estado de Planejamento e Avaliação. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Folha SD.24 Salvador: potencial dos recursos hídricos*. Rio de Janeiro: 1999.
- INDA, H. A. V. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: textos básicos, volume 1*. Salvador: Secretaria das Minas e Energia/ Coordenação da Produção Mineral, 1979.

- INEMA. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *CBH Recôncavo Norte e Inhambupe*. Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/comites-de-bacias/comites/cbh-reconcavo-norte-inhambupe/>>. Acesso em maio de 2014.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Normas Climatológicas 1961 – 1990*. Ministério da Agricultura, Brasília, 1992.
- JOUZEL J, MERLIVAT L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modelling of the isotopic effects during snow formation. *J. Geophys. Res.* 89, 11749–11757, 1984.
- LEÃO, M. R. C. *Aspectos da Circulação da Água no Aquífero São Sebastião*. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2003.
- LEITE, D. C. *Possibilidade de água subterrânea na Bacia do Recôncavo Baiano*. Rel Int. Petrobrás, Salvador-BA; 1964.
- LEMOINE, B. *Essai de Classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines*. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*. Supplement. France: 1954.
- LIMA, O. A. L. *Avaliação hidrogeofísica de arenitos aquíferos na Bacia Recôncavo-Tucano (BA)*. In: *Anais, 2º Con. Grupo Internat. Soc. Bras. Geof.* vol. 1, pp. 1016–1022, Salvador: SBGf, 1991.
- LIMA, O. A. L. *Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari - Dias D'Ávila*. Tese Prof. Titular, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1999.
- LOPES, E. L. N.; FERNANDES, A.R.; GRIMALDI, C.; RUIVO, M. L.P.; RODRIGUES, T. E.; SARRAZIN, E. *Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de uso, nas margens do rio Guamá, Belém, Pará*. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, Belém, v. 1, n. 1, p. 127-137, jan-abr. 2006.
- MARTINELLI, L. A.; OMETTO., J. P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M.Z. *Desvendando Questões Ambientais com Isótopos Estáveis*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- MATHESS, G., HARVEY A. *The Properties of Groundwater*. 1 ed. [SI:sn] 1982.
- MEDEIROS, R. A.; PONTES, F. C. *Roteiro geológico da bacia do Recôncavo*. Salvador: Petrobras, 1981.
- MELIVAT, L.; JOUZEL, J. *Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation*. *Journal of geophysical research* Vol 84, 5029-5033. 1979.

- MILANI, E.J. *Aspectos da evolução tectônica das bacias do recôncavo e tucano sul, Bahia, Brasil*. 57 p. Dissertação de Mestrado em Geociências, Departamento de geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 1987.
- MOOK, W. G.; VRIES, J.J. *Water sampling and laboratory treatment*. In: *Environmental isotopes in the hydrological cycle*. Principles and applications. IAEA, Vienna. Vol I, Introduction – theory, methods, review: 167-178, 2001.
- MOTA, S.U.S. *Caracterização Hidrogeológica do setor Oriental do Polo. Salvador – BA*. 68 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pesquisa em Geologia e Geofísica. Instituto de Geociências - UFBA, 2004.
- MOSMANN, R.; TONIATTI, G. *Estudos estratigráficos na Formação São Sebastião – Cretáceo da Bahia*. PETROBRAS-RPBA, Relatório Técnico, Rio de Janeiro, 1968.
- NASCIMENTO, S. A. M.; ALVES, J. E. *Caracterização hidrogeoquímica e evolução da água subterrânea na área do Polo Industrial de Camaçari – Bahia*. In: *Cadernos de Geociências*, Vol. 8, No 2, 2011.
- OLIVEIRA, J. B. *Pedologia aplicada*. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 574 p, 2005.
- PARKHURST, D. L. E APPELO, C. A. J. *User's guide to PHREEQC (Version 2)*—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Report 99-4259, 310 pp, 1999.
- PETROBRÁS/UFBA - Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente. *Estudo de Disponibilidade Hídrica e Projeção de Cenários Futuros nas Bacias Hidrográficas do Recôncavo Norte, Inhambupe e seus Domínios Aquíferos (Estado da Bahia)*. Relatório Interno. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.
- PIPER, A. M. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses*. Transactions American Geophysical Union, v. 25, p. 914-928, 1944.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 338 p., 2002.
- RIBEIRO, R.S.; *Aspectos hidrogeológicos da porção leste da bacia do recôncavo norte- Bahia*. 45f. Trabalho Final de Graduação – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2013.
- ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINNI, R. *Isotopic patterns in modern global precipitation*. In: *Continental Isotopic Indicators of Climate*, American Geophysical Union Monograph. 1993.

- SALATI, E.; GUSMÃO, G.A.; MATSUI, E.; CERVELLINI, A. *Estudo Preliminar das concentrações de ^{18}O e D em águas do nordeste brasileiro*. USP – CNEN. Piaracicaba – SP. 1971.
- SANTOS, C.F.; CUPERTINO, J.A.; BRAGA, J.A.E. *Síntese sobre a geologia das bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá*. In: Raja Gabaglia, G.P. & Milani, E.J. (ed.) *Origem e evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobras. P. 235-266, 1990.
- SANTOS, T. H. R. *Comparação entre os métodos IRMS e CRDS na determinação das razões isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ em água*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2013.
- SANTOS, C. P. L. *Análise dos processos de salinização das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre por meio de traçadores ambientais*. Tese de doutorado - Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2008.
- SEABRA, G. M. *A presença do flúor nas águas subterrâneas da formação sergi (jurássico superior) da bacia do recôncavo no estado da Bahia, Brasil*. 76 f. Tese (Monografia). Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador: 2011.
- SEI - Superintendência de Estudos Sociais e Econômicos. *Análises de atributos climáticos do Estado da Bahia*. In: Série Estudos e Pesquisas, vol. 38, 1998.
- SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. *Fichas de poços tubulares*. Disponível em <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php>. Acesso em 20 de agosto de 2015.
- SILVA, C. R. *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro*. Rio de Janeiro: CPRM, 264 p, 2008.
- SILVEIRA JÚNIOR, J. S. C. *Avaliação do grau de internalização da proteção da água subterrânea no Polo Industrial de Camaçari*. Salvador: 2004.
- STEWART, M. K. *Stable Isotope Fractionation Due to Evaporation and Isotopic Exchange of falling water drops: Application to atmospheric processes and evaporation of lakes*. Journ. Geoph. Resources, vol 80, no 9, 1133-1146, 1975.
- SPENCER, J. E TELMER, K. *The role of sulfur in chemical weathering and atmospheric CO_2 fluxes: Evidência from major ions, $^{13}\text{C}_{\text{cid}}$ e $^{34}\text{S}_{\text{so4}}$ in rivers of the Canadian cordillera*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(23):5441-5458. 2005.
- SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., EDUSP, 383pp, 2003.
- SZIKSZAY, M. *Geoquímica das Águas*. Boletim IG, São Paulo, n. 5, 1993.

TONIETTO, A. E. *Especiação química de cobre e zinco nas águas do reservatório do Iraí: efeitos da matéria orgânica e interação com microalgas*. (2006). Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/5954/Alessandra%20E.%20Tonietto.pdf?sequence=1>>. Acesso em 15 de janeiro de 2012.