



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELO DE RECARGA E CIRCULAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA  
UTILIZANDO DADOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  E  $^3\text{H}$  EM  
ROCHAS CRISTALINAS DO SUL DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

**Autor:** Matheus Serri Moulin de Oliveira

**Orientador:** Prof. Dr. Fabrício de Andrade Caxito

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mirna Aparecida Neves

**Nº 217**

**BELO HORIZONTE**

**DATA (31/08/2020)**

**MATHEUS SERRI MOULIN DE OLIVEIRA**

**MODELO DE RECARGA E CIRCULAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA  
UTILIZANDO DADOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  E  $^3\text{H}$  EM  
ROCHAS CRISTALINAS DO SUL DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

Instituto de Geociências

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de mestre em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício de Andrade Caxito

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mirna Aparecida Neves

Belo Horizonte - MG

2020

O48m  
2020

Oliveira, Matheus Serri Moulin de.

Modelo de recarga e circulação da água subterrânea utilizando dados hidroquímicos e isotópicos de  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$  em rochas cristalinas do sul do estado do Espírito Santo [manuscrito] / Matheus Serri Moulin de Oliveira. – 2020.

86 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Fabrício de Andrade Caxito.

Coorientadora: Mirna Aparecida Neves.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 68-75.

1. Química da água – Teses. 2. Hidrogeologia – Teses. 3. Rochas cristalinas – Espírito Santo – Teses. I. Caxito, Fabrício de Andrade. II. Neves, Mirna Aparecida. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3(815.2)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Modelo de Recarga e Circulação da Água Subterrânea Utilizando Dados Hidroquímicos e Isotópicos de  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$  em Rochas Cristalinas do Sul do Estado do Espírito Santo**

**MATHEUS SERRI MOULIN DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 31 de agosto de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Fabrício de Andrade Caxito - Orientador  
UFMG

Prof. Rubens Martins Moreira

Prof. Rodrigo Sérgio de Paula  
UFMG

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2020.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e ao Instituto de Geociências – IGc pela oportunidade de ampliar meus conhecimentos. E aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia que tornaram isso possível.

Agradeço à CAPES que apoiou com o custeio de atividades de campo, especialmente para coleta de amostras para análise de Trítio ( $^3\text{H}$ ).

Ao orientador, professor Dr. Fabrício Caxito, pelo voto de confiança e por encarar junto comigo este desafio.

Em especial, a professora Dr<sup>a</sup>. Mirna Aparecida Neves, pessoa que tenho imensa gratidão pela paciência, incentivo e orientações valiosas que me deu durante muitos anos de parceria.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste trabalho (convênio 01.10.0808.00). Ao Projeto Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados – HIDROFRAT e sua equipe que possibilitaram as campanhas de campo e análises hidroquímicas e de isótopos estáveis e ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Nucleares – CDTN pelas análises de  $^3\text{H}$ .

A Deus por ter me abençoado com saúde e sabedoria, obrigado, Pai!

A minha família, meus pais Juarez e Adriana e irmãos Vitor, Ester e Daniel, que esquentam meu coração de saudades para revê-los, e por sempre me incentivarem a crescer.

A empresa MDGEO que me concedeu a oportunidade de conciliar o mestrado com minha rotina de trabalho e por toda experiência que me passou enquanto pude ter o prazer de fazer parte de sua equipe. Também agradeço aos meus gestores e companheiros de trabalho na Mina Várzea do Lopes e Miguel Burnier da GERDAU pela confiança e por me permitirem aprender cada dia mais sobre Hidrogeologia.

Também agradeço, a pessoas muito especiais como Mateus de Filippo, a turma do alojamento e Maria Isabel, que pelo companheirismo se tornaram grandes amigos.

*Água que nasce na fonte  
Serena do mundo  
E que abre um  
Profundo grotão  
Água que faz inocente  
Riacho e deságua  
Na corrente do ribeirão  
[...]*

*Água que o sol evapora  
Pro céu vai embora  
Virar nuvens de algodão  
Gotas de água da chuva  
Alegre arco-íris  
Sobre a plantação  
[...]*

*Águas que movem moinhos  
São as mesmas águas  
Que encharcam o chão  
E sempre voltam humildes  
Pro fundo da terra*

*Planeta Água*

*Trechos da canção de Guilherme Arantes*

## RESUMO

No Estado do Espírito Santo, a busca por água subterrânea vem crescendo consideravelmente frente aos eventos de escassez que marcaram os últimos anos. No entanto, a carência de conhecimentos hidrogeológicos compromete a locação de poços e a previsão da qualidade das águas, especialmente nos terrenos de rochas cristalinas. Este trabalho teve como objetivo a avaliação das características hidrogeoquímicas e isotópicas do Sistema Aquífero Cristalino na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), situada no sul do Estado do Espírito Santo, buscando a compreensão das variações e condicionantes que influenciam a recarga e qualidade da água subterrânea, contribuindo também para o entendimento do seu modelo conceitual de circulação. Na porção da Alta BHRI onde ocorrem as maiores altitudes e relevo mais acidentado, as águas subterrâneas são bicarbonatadas mistas e pouco mineralizadas ( $244,60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), com elementos providos pelo intemperismo de rochas silicáticas ígneas e metamórficas. Na porção da Média BHRI, onde as temperaturas são mais elevadas, altitudes menores e relevo mais suave, as águas subterrâneas são predominantemente sódicas mistas ou mistas cloretadas e progressivamente mais mineralizadas ( $991,38 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), devido a contribuição de rochas silicáticas em associação com litotipos carbonáticos e maior evaporação durante a recarga. A assinatura isotópica da água da chuva é definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49\delta^{18}\text{O} + 18,97$ , mostrando fracionamento das massas de ar em condição de não equilíbrio físico-químico por meio dos efeitos de quantidade de precipitação, altitude e continentalidade. A assinatura isotópica da água subterrânea é semelhante a água da chuva, indicando infiltração rápida com variações conforme condições climáticas, especialmente nas áreas mais quentes onde os desvios isotópicos da água de alguns poços se afastam da linha meteórica local. Na porção da Alta BHRI a assinatura isotópica é próxima da água da chuva e os tempos de renovação menores que 25,75 anos. Na porção da Média BHRI a assinatura isotópica é mais enriquecida e os tempos de renovação de até 85 anos. Existe uma tendência de maior mineralização, enriquecimento isotópico e tempos de renovação que confere a circulação da água subterrânea das regiões topograficamente elevadas rumo às porções mais baixas sob influência principalmente do relevo. O uso e ocupação do solo exercem influência pontual na qualidade da água, especialmente em locais próximos a atividades industriais ou agrícolas. Este trabalho propõe um modelo que mostra que a recarga do sistema aquífero cristalino acontece em toda área de estudo, sendo a circulação governada por linhas de fluxo de escala local até regional.

**Palavras Chave:** Hidrogeoquímica, hidrogeologia isotópica, rochas cristalinas.

## ABSTRACT

The groundwater demand in the state of Espírito Santo (Brazil), is growing up considerably due to the events of drought in recent years. However, the lack of hydrogeological knowledge compromises water-well location and the prediction of the quality of water, mainly where crystalline rocks occur. This work aimed to evaluate the hydrogeochemical characteristics of the Crystalline Aquifer System in the Itapemirim watershed (IRW), located in the Southern part of Espírito Santo, looking for the role that plays the conditioners and variables in the groundwater recharge and quality, also contributing to the understanding of its conceptual model of circulation. . In the High IRW portion where the highest altitudes and the most rugged terrain occur, groundwater is mixed and little mineralized ( $244.60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), with elements provided by the weathering of igneous and metamorphic silicate rocks. In the Medium IRW portion, where temperatures are higher, lower altitudes and smoother relief, groundwater is predominantly sodic mixed or mixed chlorinated and progressively more mineralized ( $991.38 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), due to the contribution of rocks silicates in association with carbonate lithotypes and greater evaporation during recharge. The isotopic signature of rainwater is defined by the equation  $\delta^2\text{H} = 8.49\delta^{18}\text{O} + 18.97$ , showing fractionation of air masses in a condition of non-physical-chemical balance. The isotopic signature of groundwater is similar to rainwater, indicating rapid recharge with variations according to climatic conditions, especially in the warmer areas where isotopic deviations of groundwater from some wells depart from the local meteorological line. The isotopic signature is close to rainwater and renewal times less than 25.75 years. Besides that, the isotopic signature is more enriched and the renewal times of up to 85 years. There is a trend towards greater mineralization, isotopic enrichment and renewal times, which gives groundwater circulation in topographically elevated regions towards the lower portions under the influence mainly of the relief. Land use and occupation have a punctual influence on water quality, especially in places close to industrial or agricultural activities. This work proposes a model that shows that the recharging of the crystalline aquifer system occurs in the entire study area, with the circulation governed by flow lines from local to regional scale.

**Keywords:** hydrochemistry, isotope hydrogeology, crystalline rocks.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), no Espírito Santo (1 = limite da BHRI; 2 = área de estudos; 3 = principais rodovias; 4 = hidrografia; 5 = cidade: CI - Cachoeiro de Itapemirim); 6 = divisas estaduais. ....21
- Figura 2.2: Localização dos poços tubulares profundos que constituíram os pontos de coleta de amostras representativas do SAC na BHRI e (B) detalhe no município de Cachoeiro de Itapemirim - CI, onde há maior número de poços. (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante) (Fonte da base cartográfica: Banco de Dados Vetoriais do GEOBASES, 2002). ....22
- Figura 2.3: Mapa de zoneamento climático da região sul do Estado do Espírito Santo (adaptado de SEPLAN, 1999), onde: 1 = terras quentes e secas; 2 = terras quentes e de transição chuvosas-secas; 3 = terras de temperaturas amenas, chuvosas; 4 = terras de temperaturas amenas, chuvosas-secas e 5 = terras frias e chuvosas. (B) Mapa de precipitação total observada (adaptado de ESPÍRITO SANTO, 2018). (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante). ....24
- Figura 2.4: Geologia simplificada da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) com coberturas sedimentares mapeadas neste trabalho (unidades do embasamento cristalino conforme Vieira et al., 2014). Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011). (Principais cidades: M = Marataízes, I = Itapemirim, CI = Cachoeiro de Itapemirim, V = Vargem Alta, C = Castelo, JM = Jerônimo Monteiro, A = Alegre, G = Guaçuí, MF = Muniz Freire. Zonas de Cisalhamento: G = Zona de Cisalhamento Guaçuí, B = Zona de Cisalhamento Batatais. Lineamentos: A = Alegre, I = Itaoca, P = Piúma) (Litotipos: 1 = Sedimentos quaternários, 2 = Fm. Barreiras, 3 = Maciços Granitoides, 4 = Charnoquitos, 5 = Granitoides pouco foliados, 6 = Ortogranulitos, 7 = Granitoides foliados a gnaissicos: ortognaisses, tonalitos e granodioritos, 8 = Gnaisses com intercalação de quartzitos, calciossilicáticas e anfibolitos, 9 = Gnaisses com intercalações de anfibolitos, rochas calciossilicáticas e mármore, 10 = Gnaisses quartzosos, 11 = Gnaisses e anfibolitos, 12 = Gnaisses e kinzingitos, 13 = Biotita xistos com intercalações de metavulcânicas e gnaisses quartzíticos, 14 = Gnaisses e gnaisses miloníticos, 15 = Granulitos). ....25
- Figura 2.5: (A) Variação altimétrica da área e delimitação dos setores da (3) Alta, (2) Média e (1) Baixa BHRI, os quais coincidem com os compartimentos Mantiqueira, Cachoeiro e

Litorâneo de Peixoto-Oliveira et al. (2018). (B) Mapa de altimetria simplificado. Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante). .....	26
Figura 2.6: Distribuição espacial dos sistemas aquíferos da BHRI (SAS = Sistema Aquífero Sedimentar; SAC = Sistema Aquífero Cristalino) (Compartimentos: 3 = Alta BHRI; 2 = Média BHRI; 3 = Baixa BHRI). Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante). .....	28
Figura 2.7: Distribuição de valores dos parâmetros de qualidade da água subterrânea na BHRI, no verão e no inverno (CE: condutividade elétrica; <i>outliers</i> : valores discrepantes). .....	29
Figura 2.8: Distribuição espacial dos valores de (A) $\text{NO}_3^-$ e (B) $\text{Cl}^-$ na BHRI. A linha pontilhada delimita o compartimento da Média BHRI. ....	32
Figura 2.9: Classificação hidrogeoquímica das águas subterrâneas do meio fraturado na BHRI. ....	33
Figura 2.10: Variação espacial das características hidrogeoquímicas da água subterrânea na (A) BHRI e; (B) em Cachoeiro de Itapemirim (1 = localização dos poços; 2 = principais cidades; 3 = limite da BHRI; 4 = área urbana; 5 = principais rodovias; 6 = hidrografia; 7 = limites estaduais) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante). ....	34
Figura 2.11: (A) Relação entre elementos alcalinos e alcalinos terrosos e (B) entre ânions e elementos alcalinos na água subterrânea coletada na Alta e Média BHRI. ....	35
Figura 3.1: Localização da área de estudos. Principais cidades (A: Alegre, CI: Cachoeiro de Itapemirim, C: Castelo, CC: Conceição do Castelo, G Guaçuí, I: Itapemirim, IR: Irupi, JM: Jerônimo Monteiro, M: Marataízes, MF: Muniz Freire, MS: Mimoso do Sul, V: Venda Nova do Imigrante, VA: Vargem Alta) e pontos de referência (PB: Pico da Bandeira, PA: Pedra Azul, FG: Forno Grande). Imagem ASTER GDEM v3 (NASA e METI, 2013). .....	43
Figura 3.2: (A) Mapa geológico simplificado (baseado em Vieira 1997 e Vieira et al. 2014). Imagem ASTER GEDEM v3 (NASA e METI, 2013). (Litologia = 1: Sedimentos fluviais e costeiros; 2: Formação Barreiras; 3: Granitoides; 4: Gnaisses miloníticos; 5: Mármore; 6: Paragnaisses; 7: Ortognaisses; 8: Chanockitos; 9: Granulitos); (B) Unidades hidrogeológicas da BHRI (Setores = 1: Alta BHRI; 2: Média BHRI; 3: Baixa BHRI). ....	44

Figura 3.3: (A) Localização das estações meteorológicas (Pluv: Estações pluviométricas); (B) Estações de coleta da água da chuva (Al: Alegre, An: Santa Angélica, Ca: Castelo, Cf: Café, Co: Conceição do Castelo, Ct: Castelo, Cx: Cachoeiro de Itapemirim, Ft: São José da Fruteira, Fu: Cachoeira da Fumaça, Ib: Ibitirama, Ir: Irupi, It: Itapemirim, Je: Jerônimo Monteiro, Mu: Muqui, Pi: Piaçú, Pc: Pacotuba, Sf: Safra, St: Santíssima Trindade, Tc: Tecnotruta, Ve: Venda Nova do Imigrante); (C) Poços tubulares profundos de coleta de água subterrânea; e (D) Pontos de coleta de água superficial.....	46
Figura 3.4: Padrões de precipitação na BHRI: (A) durante a série histórica completa (1956 a 2017); e (B) no período da amostragem (2013 a 2017).....	48
Figura 3.5: (A) Linha meteórica local (LML) da BHRI e Linha meteórica global (LMG); (B) LML's dos diferentes compartimentos da BHRI. ....	50
Figura 3.6: Efeito da quantidade da precipitação na BHRI. Comparação das médias mensais de precipitação com: (A) $\delta^{18}\text{O}$ ; e (B) $\delta^2\text{H}$ . ....	51
Figura 3.7: Efeitos da: (A) Altitude; e (B) distância do litoral no fracionamento isotópico da água da chuva. ....	52
Figura 3.8: Assinatura isotópica da água subterrânea na BHRI. ....	54
Figura 3.9: Correlação de valores de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ e condutividade elétrica da água subterrânea. Fatores controladores (A: evaporação; A + B: evaporação e litologias; B: litologias). ....	56
Figura 3.10: Modelo exponencial de renovação da água subterrânea na BHRI. Nesse trabalho, adota-se os termos Tempo Curto para tempo de renovação menor do que 6,50 anos; Tempo Médio entre 6,50 e 35,00 anos e Tempo Longo entre 35,00 e 85,00 anos (os números dentro do gráfico indicam os poços onde foi realizada amostragem para datação por Trítio). ....	58
Figura 3.11: Relação entre a assinatura isotópica e (A) o tempo de renovação e; (B) o grau de mineralização indicado pela condutividade elétrica das águas subterrâneas da BHRI. ....	59
Figura 3.12: Assinatura isotópica da água superficial. ....	60
Figura 3.13: Assinatura isotópica da água superficial nos córregos da: (A) Alta BHRI; (B) Média BHRI e; (C) Baixa BHRI. ....	61
Figura 3.14: Modelo hidrogeológico conceitual de circulação da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), no sul do Estado do Espírito Santo, Região Sudeste do Brasil (as letras minúsculas dentro dos círculos indicam a posição hipotética de poços representativos daqueles cuja água foi descrita ao longo do texto). ....	63
Figura 6.1: Dinâmica das massas de ar no Brasil. Massas de ar: cEm = Massa Equatorial Continental; cTm = Massa Continental Tropical; aTm = Massa Tropical Atlântica; aEm = Massa Equatorial do Atlântico; aPm = Massa Polar Atlântica. ....	85

Figura 6.2: Mapa de zoneamento climático da região sul do Estado do Espírito Santo (adaptado de SEPLAN, 1999), onde: 1 = terras quentes e secas; 2 = terras chuvosas-secas quentes e transitórias; 3 = temperaturas amenas e terras chuvosas; 4 = temperaturas amenas e chuvoso-seco, e; 5 = terras frias e chuvosas. .... 86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores médios dos parâmetros hidrogeoquímicos da água subterrânea do Sistema Aquífero Cristalino na BHRI. Unidades de medida: CE em $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ; Turbidez em Unidade Nefelométrica de Turbidez - UNT; STD, $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{Mg}^{+2}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{-2}$ , $\text{HPO}_4^{-2}$ e $\text{NO}_3^-$ (como nitrato), $\text{NO}_2^-$ , $\text{NH}_4^+$ e $\text{Li}^+$ em $\text{mg.L}^{-1}$ . Números em vermelho são valores acima do VMP (Valor Máximo Permitido) pela Portaria de Consolidação nº 05 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) (VAP = porcentagem de valores acima do VMP) (N.M. = Não Medido). ....	29
Tabela 2.2: Matriz de correlação dos parâmetros hidroquímicos analisados (valores em negrito indicam correlação positiva forte). ....	32
Tabela 2.3: Índices geoquímicos das águas coletadas em poços ao longo da BHRI. ....	36
Tabela 3.1: Composição isotópica e condutividade elétrica na água subterrânea (valores médios). ....	55
Tabela 6.1: Resultados do monitoramento de isótopos estáveis da água da chuva nas 20 estações de coleta da BHRI.....	76
Tabela 6.2: Resultados da campanha de amostragem de agosto/2018 para análises de Trítio ( $^3\text{H}$ ). ....	83
Tabela 6.3: Resultados do monitoramento de isótopos estáveis da água superficial nos 10 pontos de coleta no Rio Itapemirim e seus afluentes. ....	84

## SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>15</b>
<b>2. CAPÍTULO II – HIDROGEOQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO NO SUL DO ESPÍRITO SANTO .....</b>	<b>18</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	19
2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
2.3. ÁREA DE ESTUDOS .....	23
2.3.1. Clima .....	23
2.3.2. Geologia e Geomorfologia .....	24
2.4. RESULTADOS .....	27
2.4.1. Distribuição dos sistemas aquíferos na BHRI .....	27
2.4.2. Características hidroquímicas das águas subterrâneas na BHRI .....	28
2.4.3. Classificação da água subterrânea e compartimentação hidrogeológica .....	33
2.5. DISCUSSÃO .....	37
2.6. CONCLUSÕES .....	39
<b>3. CAPÍTULO III – DADOS ISOTÓPICOS DE <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H E <sup>3</sup>H PARA O ENTENDIMENTO DO SISTEMA DE RECARGA E CIRCULAÇÃO EM ROCHAS CRISTALINAS.....</b>	<b>40</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	41
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	42
3.2.1. Área de estudos.....	42
3.2.2. Análises de isótopos estáveis: Oxigênio 18 ( <sup>18</sup> O) e Deutério ( <sup>2</sup> H).....	45
3.2.3. Análises de Trítio ( <sup>3</sup> H).....	46
3.3. RESULTADOS .....	48
3.3.1. Variações da pluviosidade na BHRI.....	48
3.3.2. Assinatura isotópica da água da chuva .....	49
3.3.3. Assinatura isotópica da água subterrânea.....	53
3.3.4. Conteúdo de Trítio ( <sup>3</sup> H).....	57

3.3.5. Assinatura isotópica da água superficial .....	60
3.4. DISCUSSÃO .....	62
3.5. CONCLUSÕES .....	64
<b>4. CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>
<b>6. MATERIAL SUPLEMENTAR .....</b>	<b>76</b>

## 1. CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) e seu entorno, que é uma das principais redes hidrográficas do Espírito Santo, cobrindo praticamente toda a porção sul do estado e uma pequena área do sudeste de Minas Gerais. Possui cerca de 6.014 km<sup>2</sup> e abrange 17 municípios capixabas e um mineiro, estando em uma região de importante desenvolvimento socioeconômico, principalmente pelas atividades agropecuárias e produção de rochas ornamentais.

O substrato dessa região é composto essencialmente por rochas cristalinas pré-cambrianas a cambrianas (gnaisses, granitos, mármore e calcissilicáticas) que são recobertas localmente por sedimentos semiconsolidados e inconsolidados recentes. Nestas unidades geológicas estão distribuídas as duas principais unidades hidrogeológicas do sul do estado do Espírito Santo, o Sistema Aquífero Cristalino que é composto pelo aquífero fraturado presente nas rochas cristalinas e aquífero granular do manto de intemperismo sobrejacente, e o Sistema Aquífero Sedimentar que é composto pelos aquíferos granulares nos depósitos sedimentares semiconsolidados e inconsolidados aluvio e coluvionares. Além disso, a riqueza litológica e variedade estral permitem uma compartimentação clara do relevo em uma área relativamente pequena, o que permite a divisão da bacia em três setores geomorfológicos distintos, que influenciam também no clima e precipitação da região.

Devido ao intenso período de menor precipitação ocorrido em toda Região Sudeste do Brasil durante os anos de 2013 e 2016 intensificou-se a busca por água subterrânea através de poços tubulares profundos no aquífero fraturado como alternativa para o abastecimento público e privado. Os aquíferos fraturados são importantes fontes captação de água em diversos países e no Brasil, contudo, no estado do Espírito Santo o conhecimento desses aquíferos em rochas cristalinas ainda é incipiente. Isso motivou a realização de um estudo para conhecimento dos fatores controladores da qualidade da água subterrânea e de seu sistema de recarga e circulação, visando fornecer uma importante base para redução de perdas com perfurações de poços tubulares mulsucedidas e com boa qualidade para o consumo humano.

Portanto, os objetivos deste estudo foram (1) descrever as variações e os condicionantes da qualidade da água subterrânea captada em poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Cristalino na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim, e (2) determinar a partir de isótopos estáveis (<sup>18</sup>O e <sup>2</sup>H), do Trítio (<sup>3</sup>H) e grau de mineralização,

padrões de comunicabilidade entre águas pluviais, superficiais e subterrâneas, buscando identificar o sistema de recarga e o fluxo subterrâneo na área.

Para tanto, esta dissertação foi dividida em dois artigos, que mostram o desenvolvimento e resultados dos estudos hidrogeoquímicos (Artigo I) e isotópicos (Artigo II) realizados no Sistema Aquífero Cristalino no sul do estado do Espírito Santo. O primeiro artigo (Capítulo II da dissertação), intitulado como “Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Cristalino no sul do estado do Espírito Santo – Brasil” utilizou análises de águas de 36 poços tubulares que exploram basicamente do aquífero fraturado, a partir de onde foi possível a classificação da água e verificação de índices geoquímicos por meio de ânions e cátions principais como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , bem como cálculo do balanço iônico e identificação de fatores antrópicos interferindo na qualidade da água subterrânea utilizando concentrações de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$  e  $\text{Li}^+$ . Nesta parte do estudo, foi identificada uma tendência de aumento da mineralização da água subterrânea das regiões mais altas para mais baixas da bacia, o que foi relacionado a evaporação, tempo de residência, litotipos e presença de fluxos locais e regionais.

O segundo artigo (Capítulo III da dissertação), intitulado “Dados isotópicos de  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$  para o entendimento do sistema de recarga e circulação da água subterrânea em terrenos cristalinos no estado do Espírito Santo, Sudeste do Brasil” possibilitou, a partir de 347 medidas de  $\delta^{18}\text{O}\%$  e  $\delta^2\text{H}\%$ , a elaboração de uma robusta Linha Meteórica representada pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49\delta^{18}\text{O} + 18,97$ , que mostra forte fracionamento isotópico das massas de ar em condições de não equilíbrio, e chama atenção para o excesso de Deutério que é semelhante a de áreas com latitude mais elevadas ou de interior continental, o que não era esperado para uma região costeira de clima tropical. Neste estudo, foi percebida a influência da quantidade de precipitação, altitude e distância do litoral no fracionamento isotópico, tornando a precipitação nas áreas mais altas, amenas e continentais cada vez mais empobrecida em isótopos pesados, enquanto o inverso ocorre nas regiões mais baixas, quentes e próximas ao litoral. A assinatura isotópica da água subterrânea, concebida através de 99 medidas de  $\delta^{18}\text{O}\%$  e  $\delta^2\text{H}\%$  de 46 poços tubulares, é muitas vezes próxima da água da chuva, indicando recarga rápida, exceto em localidades mais quentes onde a infiltração ocorre sob efeito da evaporação na zona vadosa do solo. Neste estudo estão as primeiras análises de Trítio ( $^3\text{H}$ ) realizadas em aquíferos cristalinos no estado do Espírito Santo, essas análises foram possíveis graças ao apoio do Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Nucleares (CDTN), de Belo Horizonte (MG), e indicaram a presença de fluxos locais até regionais, confirmando os fatores controladores da qualidade da



água subterrânea identificados na primeira fase do estudo hidrogeoquímico. A mineralização da água é controlada pela evaporação, tempo de renovação (tempo da água em contato com as rochas no aquífero) e aos litotipos. Também foram realizadas 40 amostragens de água superficial em 10 pontos ao longo do leito do Rio Itapemirim, desde sua cabeceira até a Foz, permitindo a identificação da comunicação com a água subterrânea e determinação de sua natureza efluente, ou seja, canais que são abastecidos pelo Sistema Aquífero Cristalino. Por fim, neste trabalho também foi percebida a influência do relevo e controle estrutural na composição mineral e assinatura isotópica, o que possibilitou a concepção de um modelo hidrogeológico conceitual de recarga e circulação.

Este trabalho permitiu a identificação das principais áreas de recarga e comportamento da água subterrânea no Sistema Aquífero Cristalino na região sul do estado do Espírito Santo, mostrando um importante papel da distribuição do relevo, clima e geologia na qualidade da água subterrânea.

Esta dissertação é um dos produtos do Projeto “Hidrogeologia de Aquíferos Fraturados” (HIDROFRAT) financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) por meio do convênio 01.10.0808.00, que foi desenvolvido em quatro estados brasileiros, cada qual com seu subprojeto direcionado ao estudo de aquíferos fraturados em diferentes escalas de trabalho. No estado do Espírito Santo, o objetivo do estudo foi a identificação dos controles da produção de água subterrânea em poços por meio de estudos regionais, onde foi realizado o monitoramento hidroquímico da água subterrânea e isotópico ( $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ ) da água da chuva, subterrânea e superficial, utilizados neste estudo.

## **2. CAPÍTULO II – HIDROGEOQUÍMICA DO SISTEMA AQUÍFERO CRISTALINO NO SUL DO ESPÍRITO SANTO**

Neste capítulo, apresenta-se os resultados da dissertação de mestrado sob forma de artigo, que foi submetido ao periódico Geologia-USP Série Científica, ISSN 2316-9095.

### **Artigo I: Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Cristalino no sul do estado do Espírito Santo - Brasil**

**Autores:** Matheus Serri Moulin de Oliviera<sup>a</sup>, Mirna Aparecida Neves<sup>b</sup>, Ricardo César Aoki Hirata<sup>c</sup>, Reginaldo Antonio Bertolo<sup>c</sup>, Fabrício de Andrade Caxito<sup>a</sup>, Salomão Silva Calegrai<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Instituto de Geociências – IGc, Programa de Pós-Graduação em Geologia – PPGEOL, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>b</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde – CCENS, Departamento de Geologia – DEGEO, ES, Brasil

<sup>c</sup>Universidade de São Paulo – USP, Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas – CEPAS, São Paulo, SP, Brasil

Informações do autor:

Matheus Serri Moulin de Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Contato: +5528999093808

Email: [matheusserri@hotmail.com](mailto:matheusserri@hotmail.com)

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste trabalho (convênio 01.10.0808.00).

## RESUMO

No Estado do Espírito Santo, a busca por água subterrânea vem crescendo consideravelmente frente aos eventos de escassez que marcaram os últimos anos. No entanto, a carência de conhecimentos hidrogeológicos compromete a locação de poços e a previsão da qualidade das águas, especialmente nos terrenos de rochas cristalinas. Este trabalho teve como objetivo a avaliação das características hidrogeoquímicas do Sistema Aquífero Cristalino na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), situada no sul do Estado do Espírito Santo, buscando a compreensão das variações e condicionantes que influenciam a qualidade da água subterrânea, contribuindo também para o entendimento do seu modelo conceitual de circulação. A compartimentação litológica e geomorfológica da bacia e as condições climáticas são os fatores que influenciam na hidrogeoquímica em escala regional, enquanto o uso e ocupação do solo exercem influência pontual. Na porção da Alta BHRI, com relevo acidentado e predomínio de atividades agropecuárias, ocorrem principalmente águas bicarbonatadas mistas, pouco mineralizadas ( $244,60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), com elementos providos pelo intemperismo de rochas silicáticas ígneas e metamórficas. Embora sejam águas de boa qualidade, alterações locais podem ocorrer devido ao nitrato proveniente de atividades antrópicas. Na porção da Média BHRI, com menores altitudes e relevo mais suave, as águas são predominantemente sódicas mistas ou mistas cloretadas e mais mineralizadas ( $991,38 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), devido à contribuição de rochas silicáticas em associação com litotipos carbonáticos, como mármore e calciossilicáticas, que são mais solúveis. Nessa porção da bacia, as características hidroquímicas apontam para maior tempo de residência da água subterrânea e evaporação da água que infiltra no solo.

**Palavras-chave:** Água subterrânea, Meio fraturado, Rio Itapemirim

## 2.1. INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) ocorre em regiões de rochas predominantemente ígneas e metamórficas e é composto por dois subsistemas: o meio fraturado, onde a água percola nas discontinuidades da rocha sã, e o manto de intemperismo, que se comporta como um aquífero de porosidade primária (Banks et al., 2009; Foster, 2012). A rocha sã fraturada é considerada como um meio eventualmente muito transmissivo, enquanto o manto de intemperismo

sobrejacente, um meio poroso com alta capacidade de armazenamento (Lachassagne et al., 2011).

Apesar de ocorrer em grande parte da superfície terrestre, o comportamento da água subterrânea em terrenos de rochas cristalinas é ainda pouco compreendido devido ao caráter heterogêneo e anisotrópico de suas propriedades hidráulicas (Singhal e Gupta, 2010). Uma ferramenta que pode auxiliar no entendimento do fluxo subterrâneo é o estudo das características hidrogeoquímicas, cujas variações podem indicar propriedades importantes do aquífero, inclusive caminhos preferenciais de fluxo (Roques et al., 2014). Tal conhecimento é relevante em muitos países com alta demanda por água subterrânea (Subramani et al., 2010; Singaraja et al., 2014) onde, além dos processos de interação água-rocha, outros fatores, como sobre-exploração de aquíferos, destinação incorreta de efluentes industriais e de resíduos sólidos, uso intenso de fertilizantes e esgoto doméstico interferem na qualidade da água subterrânea (Raju et al., 2016; Machiwal e Jha, 2015).

No Brasil, ainda existem grandes áreas onde a hidrogeoquímica dos terrenos cristalinos é completamente desconhecida, com exceção de alguns estudos realizados nas regiões Nordeste (e.g. Gomes e Cavalcante, 2015) e Sul-Sudeste (e.g. Menezes et al., 2008; Iritani et al., 2011; Ezaki et al., 2014). No Estado do Espírito Santo, embora a maior parte do arcabouço geológico seja composto por rochas cristalinas, ainda não há conhecimento sólido sobre a qualidade da água subterrânea. Nesta região, a água para abastecimento público, residencial ou industrial provem de fontes de água superficial ou por meio de poços tubulares rasos, que exploram água do manto de intemperismo. Contudo, a escassez e os prolongados períodos de estiagem dos últimos anos têm induzido a perfuração de poços tubulares profundos, que penetram a rocha para explorar o sistema fraturado. O desconhecimento das características hidrogeológicas regionais aumenta as chances de poços secos, de baixa produção ou com água de má qualidade.

O objetivo deste trabalho foi descrever as variações e os condicionantes da qualidade da água subterrânea captada em poços tubulares profundos que exploram o Sistema Aquífero Cristalino na área de abrangência da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), situada no sul do Estado do Espírito Santo (Figura 2.1).

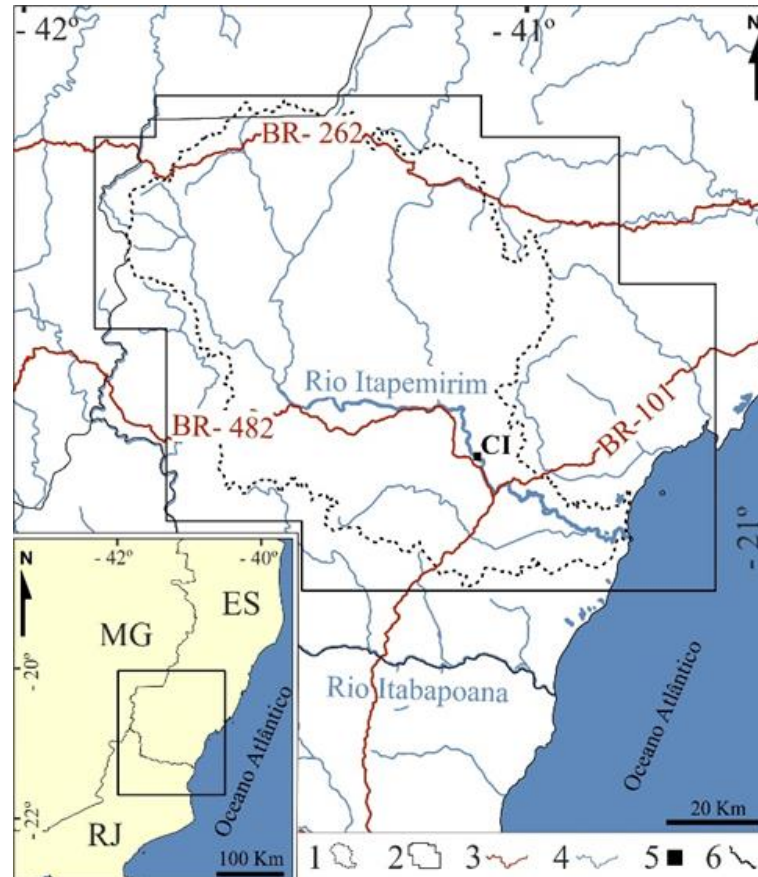


Figura 2.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), no Espírito Santo (1 = limite da BHRI; 2 = área de estudos; 3 = principais rodovias; 4 = hidrografia; 5 = cidade: CI - Cachoeiro de Itapemirim); 6 = divisas estaduais.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de água subterrânea foram coletadas em 36 poços tubulares profundos que exploram o SAC (Figura 2.2), em campanhas realizadas nas estações de chuva e de estiagem nos anos de 2014, 2015 e 2016. As amostras foram coletadas evitando o máximo possível o contato intenso da água com o ar, em um total de 76 unidades.

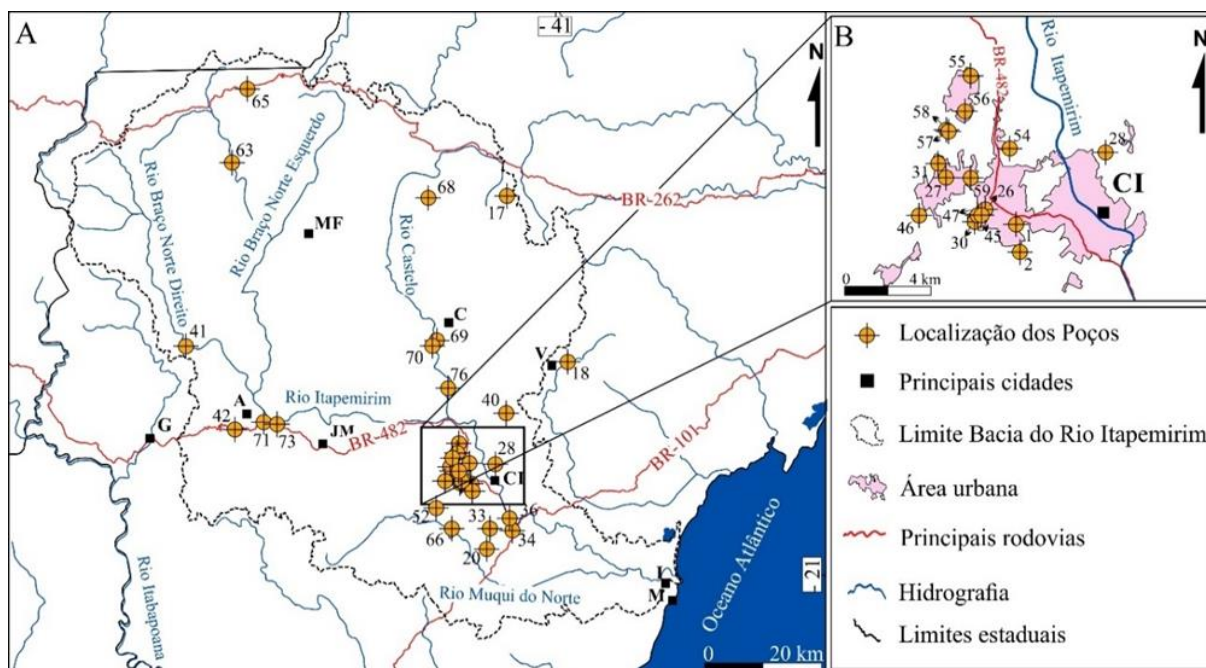


Figura 2.2: Localização dos poços tubulares profundos que constituíram os pontos de coleta de amostras representativas do SAC na BHRI e (B) detalhe no município de Cachoeiro de Itapemirim - CI, onde há maior número de poços. (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante) (Fonte da base cartográfica: Banco de Dados Vetoriais do GEOBASES, 2002).

Em campo, foram medidos os parâmetros físicos e químicos da água subterrânea: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD), por meio de um medidor multiparâmetro portátil; além da turbidez, por meio de um turbidímetro. As amostras destinadas às análises de cátions foram filtradas em filtros de acetato celulose de 0,45  $\mu\text{m}$ , acidificadas com ácido nítrico ultrapuro até  $\text{pH} < 2$  e armazenadas em frascos de polietileno, sob temperatura de 4  $^{\circ}\text{C}$ . As amostras para análise de ânions foram congeladas e as amostras para medição de alcalinidade foram armazenadas em ambiente refrigerado, evitando-se o contato com o ar. A alcalinidade total foi medida por titulação com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 0,1 ou 0,01  $\text{mol.L}^{-1}$  e indicador misto. As análises dos cátions (sódio, potássio, cálcio, magnésio, lítio e amônia) e dos ânions (sulfato, fosfato, cloreto, nitrato, nitrito, brometo e fluoreto) foram realizadas por cromatografia iônica de alta resolução (método *SMEWW 4110C*). Na análise de dados foram consideradas apenas as amostras com erro de balanço iônico menor do que 10 %.

O programa *AquaChem 2011.1/Schlumberger* foi utilizado no tratamento de dados para construção dos diagramas de *Piper* e *Stiff*. Nesta parte do trabalho, as amostras com mais de 10% de nitrato no balanço iônico foram excluídas do conjunto por serem consideradas alteradas por influência antrópica. Os *layouts* de mapas foram confeccionados por meio do *software ArcGIS® 10.2/ESRI*.

## 2.3. ÁREA DE ESTUDOS

A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) é uma das principais redes hidrográficas do Espírito Santo, cobrindo praticamente toda a porção sul do estado e uma pequena área do sudeste de Minas Gerais (BRASIL, 2010a); possui cerca de 6.014 km<sup>2</sup> e abrange 17 municípios capixabas e um mineiro.

As atividades econômicas na BHRI são relacionadas à agropecuária, como o plantio de café, hortaliças, leguminosas e a bovinocultura extensiva. O estado participa notavelmente no setor de beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente o município de Cachoeiro de Itapemirim, considerado o maior polo produtor e exportador do Brasil (Sardou-Filho et al., 2013). Esta cidade concentra 36,27 % da população sul capixaba, que é de cerca de 524.000 habitantes (BRASIL, 2010b).

### 2.3.1. Clima

O clima da região é o tropical governado pelo relevo, com duas estações bem definidas: a chuvosa, nos meses de novembro a abril, e a seca. A média anual de precipitação é de 1300 mm. Importante relatar que, na época de realização desse trabalho, entre 2014 e 2016, todo o Estado do Espírito Santo passou por um *déficit* hídrico, com cerca de 25 a 50% menos chuvas do que as médias históricas (ESPÍRITO SANTO, 2016).

Um fragmento do mapa climático (SEPLAN, 1999) mostra a distribuição das zonas climáticas na BHRI, que dividem a região em terras quentes (com temperatura média do mês mais frio de 11,8 °C e temperatura média do mês mais quente de 34,0 °C), de temperaturas amenas (9,4 e 30,7° C) e terras frias (7,3 e 27,8 °C), em associação com terras secas, transicionais e chuvosas (Figura 2.3). Essa distribuição regional das temperaturas e das chuvas é controlada pelo relevo, com porções montanhosas, mais frias e chuvosas, no entorno da porção central da bacia, mais quente e seca (ESPÍRITO SANTO, 2018).

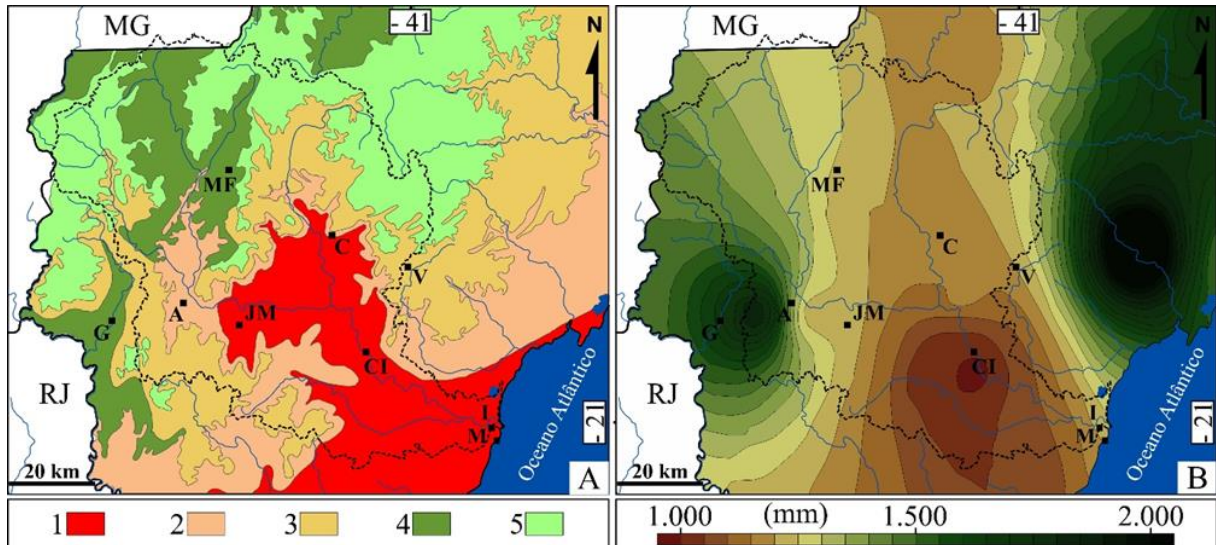


Figura 2.3: Mapa de zoneamento climático da região sul do Estado do Espírito Santo (adaptado de SEPLAN, 1999), onde: 1 = terras quentes e secas; 2 = terras quentes e de transição chuvosas-secas; 3 = terras de temperaturas amenas, chuvosas; 4 = terras de temperaturas amenas, chuvosas-secas e 5 = terras frias e chuvosas. (B) Mapa de precipitação total observada (adaptado de ESPÍRITO SANTO, 2018). (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante).

### 2.3.2. Geologia e Geomorfologia

A área de estudo está incluída no domínio geotectônico da Província Mantiqueira, na zona sul da faixa de dobramentos Araçuai (Gradim et al., 2014), compreendendo principalmente o Embasamento Pré-Cambriano, composto por rochas metamórficas como gnaisses, migmatitos, charnoquitos e milonitos, além de rochas ígneas granitoides e gabroicas cambrianas (Vieira et al., 2014). Ocorrem também, de forma mais restrita, coberturas sedimentares neogênicas da Formação Barreiras, e quaternárias, representadas principalmente por aluviões (Figura 2.4).



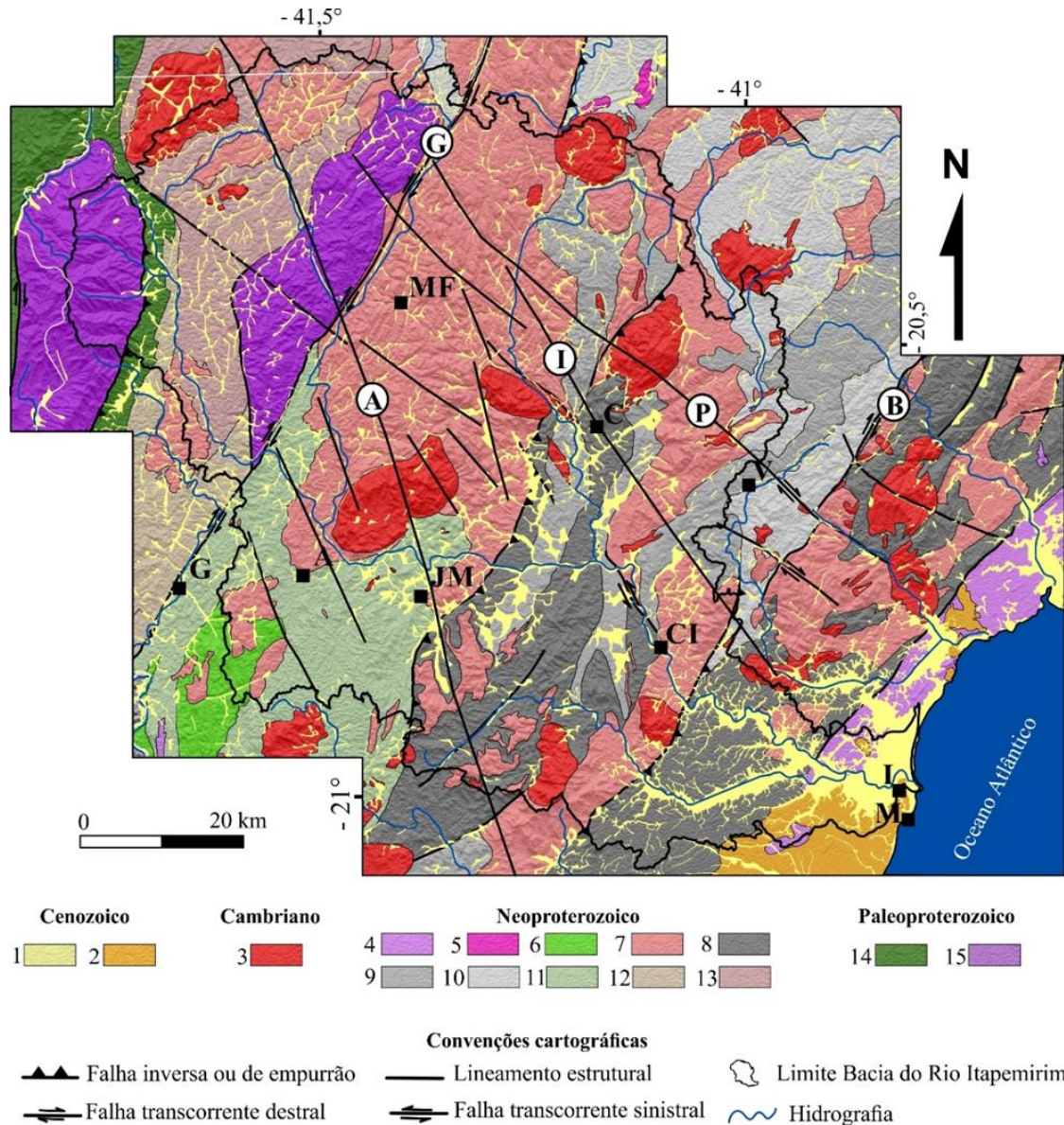


Figura 2.4: Geologia simplificada da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) com coberturas sedimentares mapeadas neste trabalho (unidades do embasamento cristalino conforme Vieira et al., 2014). Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011). (Principais cidades: M = Marataízes, I = Itapemirim, CI = Cachoeiro de Itapemirim, V = Vargem Alta, C = Castelo, JM = Jerônimo Monteiro, A = Alegre, G = Guaçuí, MF = Muniz Freire. Zonas de Cisalhamento: G = Zona de Cisalhamento Guaçuí, B = Zona de Cisalhamento Batatais. Lineamentos: A = Alegre, I = Itaoca, P = Piúma) (Litotipos: 1 = Sedimentos quaternários, 2 = Fm. Barreiras, 3 = Maciços Granitoides, 4 = Charnoquitos, 5 = Granitoides pouco foliados, 6 = Ortogranulitos, 7 = Granitoides foliados a gnaissicos: ortognaisses, tonalitos e granodioritos, 8 = Gnaisses com intercalação de quartzitos, calciossilicáticas e anfibolitos, 9 = Gnaisses com intercalações de anfibolitos, rochas calciossilicáticas e mármore, 10 = Gnaisses quartzosos, 11 = Gnaisses e anfibolitos, 12 = Gnaisses e kinzingitos, 13 = Biotita xistos com intercalações de metavulcânicas e gnaisses quartzíticos, 14 = Gnaisses e gnaisses miloníticos, 15 = Granulitos).

As diferenças litológicas e estruturais proporcionam variações geomorfológicas ao longo da bacia que, segundo Peixoto-Oliveira et al. (2018), podem ser divididas em três compartimentos

morfoestruturais: Mantiqueira, Cachoeiro e Litorâneo, respectivamente denominados aqui como as porções da Alta, Média e Baixa BHRI (Figura 2.5).

Na porção da Alta BHRI, predominam gnaisses e granitoides, compondo relevo escarpado de morros, morrotes e serras. Estruturas geológicas como foliação, extensas zonas de cisalhamento e zonas fraturadas controlam o relevo, onde são comuns os vales encaixados. Na Média BHRI, juntamente aos gnaisses e granitoides, ocorrem lentes de mármore e corpos de rochas calciossilicáticas intercaladas entre os demais litotipos. Essa região é caracterizada pela menor altitude com relação ao seu entorno, com mares de morros e vales aplainados. A Baixa BHRI é constituída por rochas gnáissicas, grande parte delas coberta por sedimentos da Formação Barreiras, além dos fluviais e litorâneos; as formas do relevo são suaves, com morros, colinas, tabuleiros e amplas planícies aluviais.

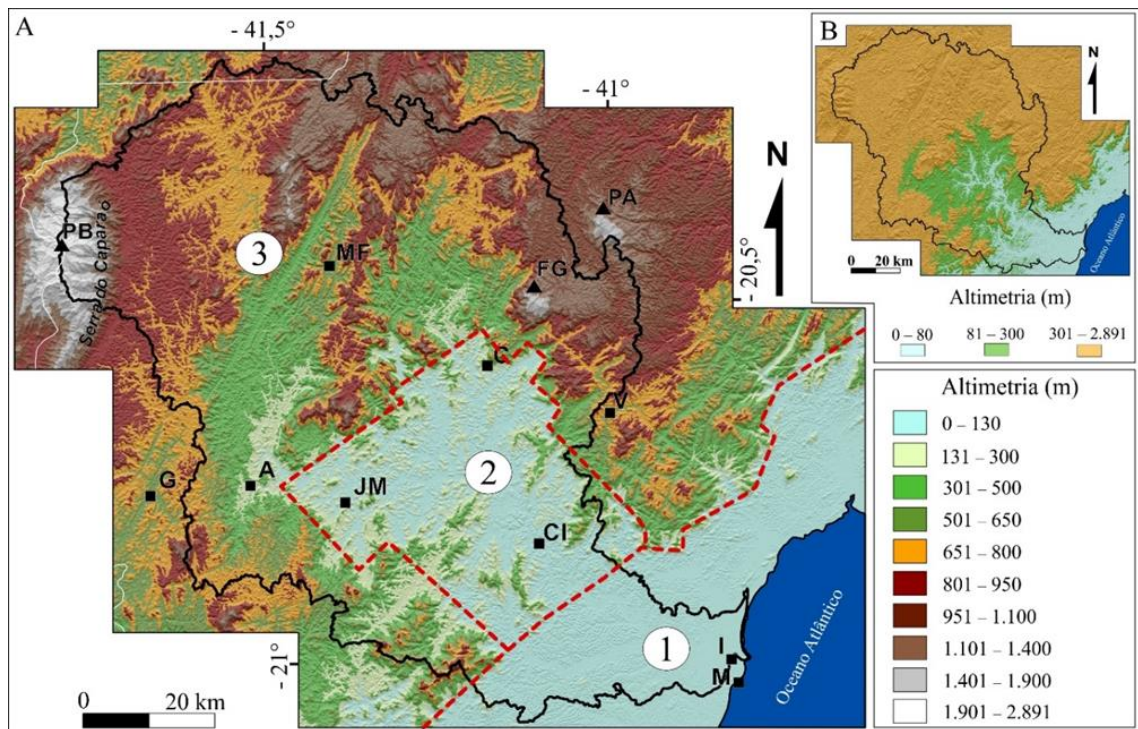


Figura 2.5: (A) Variação altimétrica da área e delimitação dos setores da (3) Alta, (2) Média e (1) Baixa BHRI, os quais coincidem com os compartimentos Mantiqueira, Cachoeiro e Litorâneo de Peixoto-Oliveira et al. (2018). (B) Mapa de altimetria simplificado. Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante).

## **2.4. RESULTADOS**

### **2.4.1. Distribuição dos sistemas aquíferos na BHRI**

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) ocupa cerca de 88% (5.228 km<sup>2</sup>) da área da BHRI. Ele compreende as rochas cristalinas fraturadas, representadas frequentemente por gnaisses e granitoides, e o aquífero associado ao manto de alteração intempérica próximo à superfície. O SAC abrange as porções da Alta, Média e Baixa BHRI e suas características são controladas pelos fatores geológicos, estruturais e geomorfológicos do Embasamento Cristalino. As abordagens deste artigo se referem à água subterrânea presente na rocha fraturada pertencente ao SAC (Figura 2.6).

Sobreposto ao SAC, ocorre também, de forma mais localizada, o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS). O SAS abrange 12% (719 km<sup>2</sup>) da área da bacia e é composto, nas porções da Alta e Média BHRI, pelos sedimentos aluviais e coluviais presentes nas planícies fluviais, fundos de vales e encostas de morros. Na porção da Baixa BHRI, especialmente na região litorânea, ocorre nas coberturas sedimentares da Formação Barreiras e nos sedimentos costeiros ou litorâneos, além dos depósitos flúvio-coluviais.

Embora o SAS seja um aquífero de porosidade intergranular, sua distribuição é controlada pelas estruturas geológicas da área, como zonas de fraturas (juntas e falhas), que compartimentam o terreno. Isso fica claro quando se observa a forma dos corpos sedimentares nas diversas porções da bacia. Na porção da Baixa BHRI, os corpos sedimentares são formas com aspecto dendrítico e de ocorrência mais ampla do que na porção da Média BHRI, onde os corpos são irregulares e relativamente menos frequentes do que na porção baixa. Na Alta BHRI, os depósitos sedimentares ocorrem como formas retilíneas e alongadas, por estarem fortemente controlados por discontinuidades (principalmente zonas fraturadas) que compõem os vales encaixados das drenagens, como é típico dos terrenos de rocha cristalina.

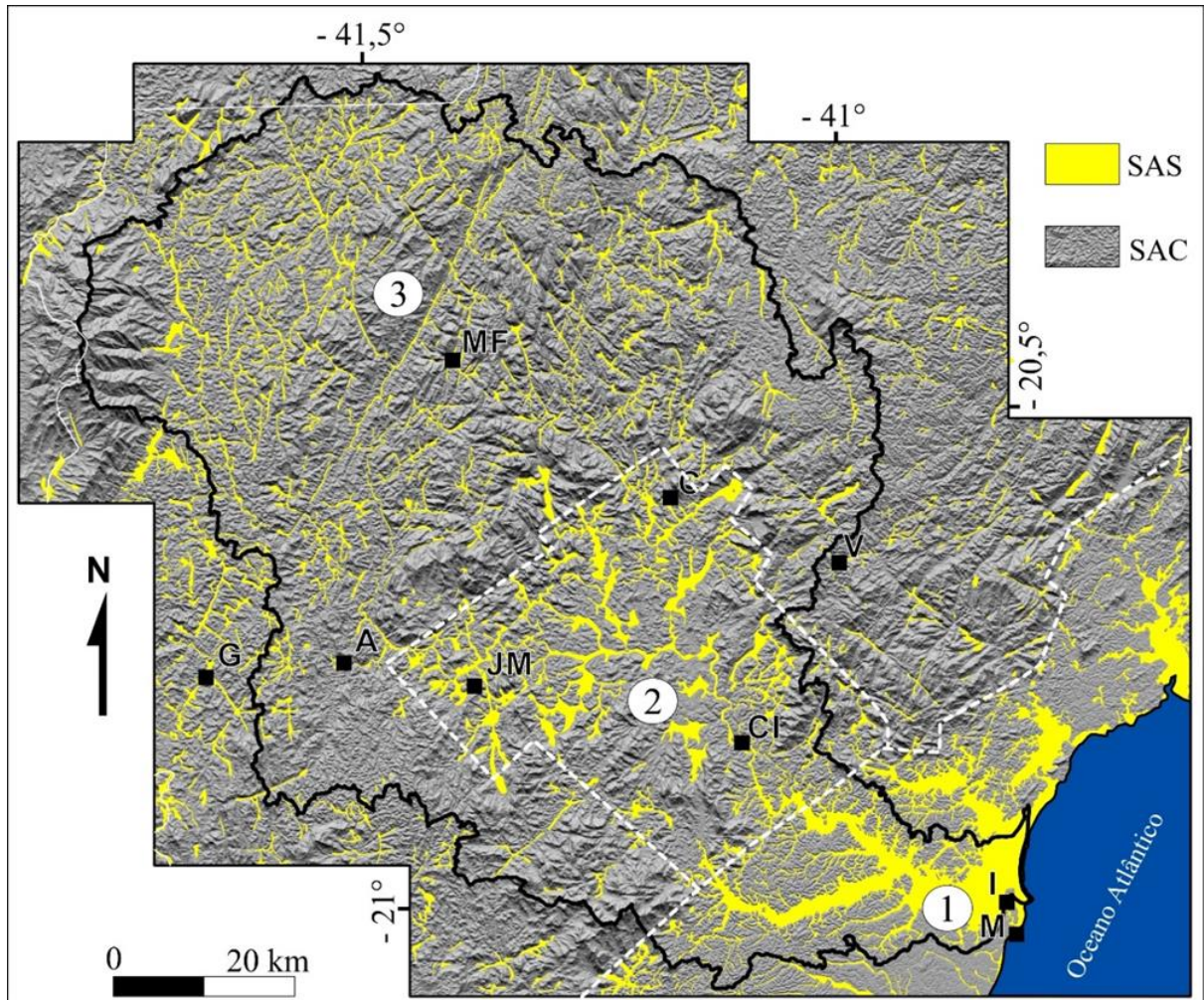


Figura 2.6: Distribuição espacial dos sistemas aquíferos da BHRI (SAS = Sistema Aquífero Sedimentar; SAC = Sistema Aquífero Cristalino) (Compartimentos: 3 = Alta BHRI; 2 = Média BHRI; 3 = Baixa BHRI). Imagem ASTER GDEM v2 (NASA e METI, 2011) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante).

#### 2.4.2. Características hidroquímicas das águas subterrâneas na BHRI

Os parâmetros hidrogeocímicos medidos na BHRI nas estações de chuvas (verão) e de estiagem (inverno) não apresentaram variações significativas (Figura 2.7), ao contrário do que relatam trabalhos conduzidos em terrenos cristalinos de outros países, como na França (Roques et al., 2014) e na Índia (e.g. Negrel et al., 2011; Raju et al., 2016; Machiwal e Jha, 2015). É possível que a não observação de tais variações na BHRI seja decorrente da amostragem em um ano hidrológico anômalo, com períodos secos mais longos seguidos de períodos chuvosos com precipitação abaixo do normal, conforme descrito acima.

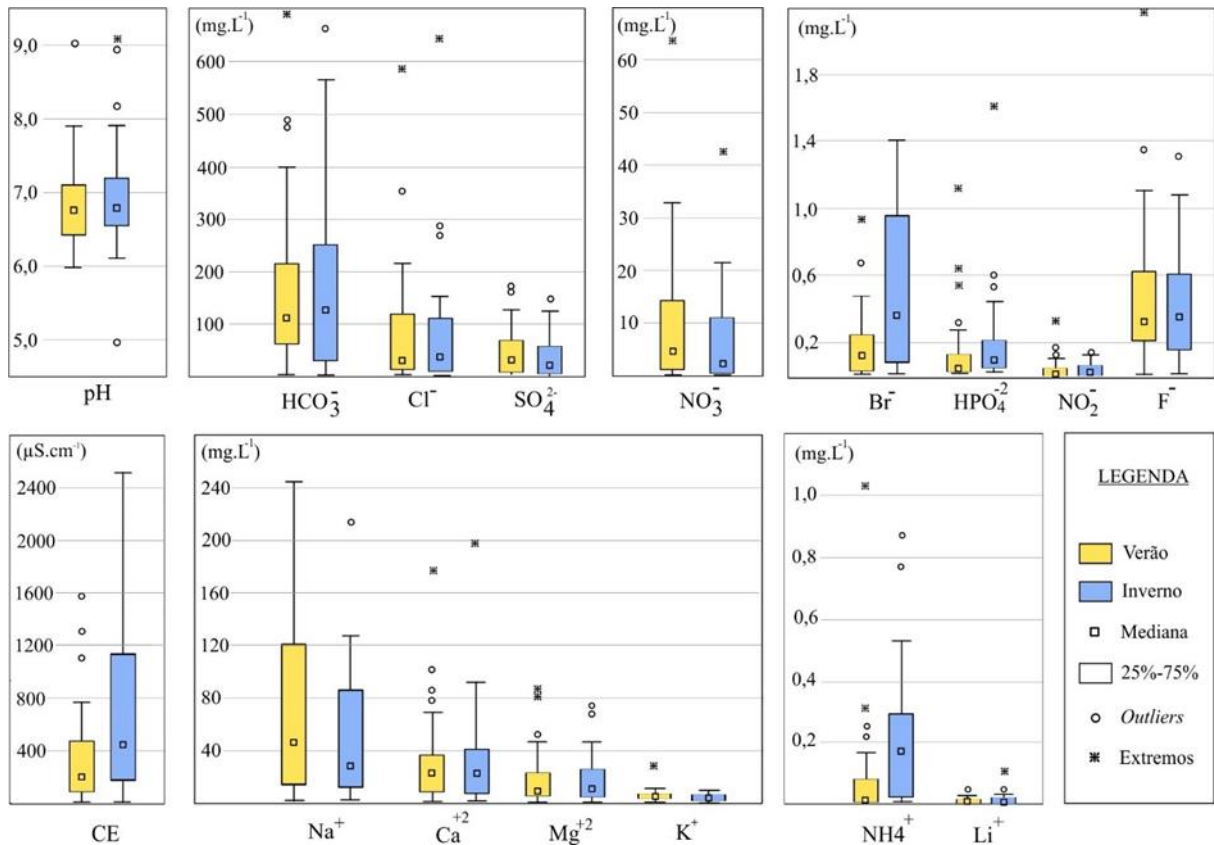


Figura 2.7: Distribuição de valores dos parâmetros de qualidade da água subterrânea na BHRI, no verão e no inverno (CE: condutividade elétrica; *outliers*: valores discrepantes).

Por tal homogeneidade das concentrações hidroquímicas, o tratamento de dados apresentado neste trabalho considera, para cada ponto de medida, a média dos valores obtidos nas campanhas de coleta (Tabela 2.1). Além dos valores médios, a Tabela 2.1 mostra também o valor máximo permitido (VMP) para alguns parâmetros, conforme a Portaria nº 05 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017).

Tabela 2.1: Valores médios dos parâmetros hidrogeoquímicos da água subterrânea do Sistema Aquífero Cristalino na BHRI. Unidades de medida: CE em  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ; Turbidez em Unidade Nefelométrica de Turbidez - UNT; STD, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (como nitrato), NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e Li<sup>+</sup> em mg.L<sup>-1</sup>. Números em vermelho são valores acima do VMP (Valor Máximo Permitido) pela Portaria de Consolidação nº 05 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) (VAP = porcentagem de valores acima do VMP) (N.M. = Não Medido).

Poço	Setor BHRI	pH	CE	STD	Turbidez	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Erro analítico (%)
17	Alta	6,71	14,18	6,62	0,74	1,97	0,46	0,05	0,61	0,00	1,40	0,01	0,01	1,05	0,11	0,55	0,21	0,005	0,000	3,55
18	Alta	6,42	78,99	39,35	0,00	4,22	1,77	0,03	25,83	0,06	5,77	0,01	0,03	4,35	1,31	5,76	1,71	0,010	0,000	3,82
41	Alta	6,45	91,64	45,52	0,13	36,52	1,17	0,45	0,48	0,00	2,29	0,08	0,32	11,23	0,78	5,04	1,73	0,011	0,000	2,77
42	Alta	6,75	180,75	90,39	0,00	44,83	7,16	0,24	22,54	0,02	10,92	0,04	0,21	12,97	4,50	12,57	3,68	0,013	0,002	5,17
63	Alta	6,87	218,67	109,37	0,30	68,30	4,61	0,14	14,49	0,01	13,56	0,11	0,24	12,45	1,93	18,38	7,16	0,014	0,000	0,07
65	Alta	7,69	77,20	38,60	0,38	20,27	0,98	0,06	13,89	0,00	1,87	0,02	0,07	3,72	1,80	7,29	1,85	0,010	0,000	1,18
68	Alta	6,93	55,35	27,72	0,00	15,63	0,55	0,02	4,25	0,00	3,36	0,02	0,06	3,06	1,86	3,69	1,64	0,005	0,000	0,90
69	Alta	6,70	316,50	158,04	0,00	111,72	12,77	0,06	1,79	0,02	19,90	0,39	0,18	23,71	2,44	23,16	12,90	0,026	0,004	3,12
70	Alta	6,28	425,00	212,00	N.M.	91,71	13,24	0,63	63,66	0,06	23,40	0,17	0,29	43,39	4,28	22,41	8,61	0,010	0,020	0,03
71	Alta	6,39	497,00	248,50	3,83	60,22	13,49	0,12	2,45	0,04	97,27	0,35	0,23	24,78	6,17	41,86	14,58	0,030	0,010	2,67
73	Alta	6,95	271,00	135,75	0,05	96,13	13,15	0,03	12,14	0,01	11,38	0,19	0,16	16,52	5,28	23,50	6,70	0,021	0,007	2,97
1	Média	7,01	709,00	359,00	0,00	165,66	60,62	0,26	23,79	0,03	50,96	0,16	0,65	104,01	2,42	30,49	8,77	0,060	0,010	2,98
2	Média	6,54	527,33	263,78	0,54	90,78	82,10	0,03	22,68	0,06	31,89	0,24	0,27	44,69	2,15	29,40	13,30	0,053	0,002	2,00
20	Média	7,68	183,04	91,65	1,49	28,62	21,73	1,36	9,25	0,01	14,15	0,02	0,60	25,66	1,26	5,61	1,70	0,027	0,004	1,94
26	Média	7,55	1105,34	458,00	2,13	169,64	55,12	0,38	5,39	0,04	121,30	0,62	0,95	132,07	14,57	11,58	9,98	0,234	0,017	3,55
27	Média	7,02	1300,56	650,78	3,85	347,56	83,81	0,02	0,42	0,07	125,37	0,70	0,67	133,21	5,72	64,11	31,43	0,251	0,019	2,13
28	Média	6,74	836,17	418,17	3,37	100,16	30,88	0,13	8,77	0,09	155,09	0,52	0,20	96,08	5,50	43,80	7,82	0,190	0,009	0,20
30	Média	6,90	1364,17	681,67	0,00	425,54	157,77	0,02	10,96	0,06	103,82	0,65	0,70	117,26	2,26	36,00	78,40	0,437	0,057	5,61
31	Média	8,10	1583,17	794,17	16,67	199,27	50,66	0,02	0,25	0,09	317,95	0,65	0,37	152,10	4,36	86,20	38,43	0,242	0,025	0,53
33	Média	6,73	328,17	164,65	0,60	58,62	20,19	0,19	17,53	0,01	21,98	0,11	0,35	25,47	2,40	19,71	4,20	0,020	0,003	0,31
34	Média	6,86	386,67	193,29	0,69	112,29	25,78	0,04	0,54	0,02	35,12	0,30	0,37	45,42	2,73	22,46	7,97	0,096	0,005	0,32
36	Média	6,95	683,67	341,50	3,73	89,13	39,79	0,02	0,26	0,07	114,86	0,44	0,32	69,57	2,49	26,93	14,69	0,949	0,003	1,87
40	Média	7,08	766,84	383,50	10,44	285,99	29,43	0,05	0,73	0,01	37,03	0,61	0,24	24,05	2,27	63,68	38,85	0,087	0,000	0,11
45	Média	7,18	1274,50	638,00	17,84	239,72	102,54	0,02	0,41	0,02	124,21	0,52	0,76	101,58	8,43	41,11	33,04	0,347	0,044	5,03
46	Média	7,28	983,17	496,84	0,21	110,04	78,22	0,10	3,86	0,09	155,86	0,44	0,40	111,73	4,87	29,81	17,40	0,147	0,018	3,23
47	Média	6,89	1560,17	783,50	9,40	322,95	131,72	0,02	0,79	0,06	182,26	0,60	1,00	139,52	5,00	57,16	41,07	0,253	0,040	7,51
52	Média	6,62	448,33	223,67	0,44	97,81	32,53	0,41	10,70	0,02	39,19	0,23	0,51	61,94	1,95	9,76	5,60	0,102	0,006	3,24
54	Média	6,58	2510,00	1253,17	0,30	160,25	64,77	0,06	8,16	0,18	613,64	0,74	0,43	216,59	5,79	188,31	42,27	0,264	0,016	1,12
55	Média	7,24	1041,33	520,00	3,13	252,17	66,32	0,05	0,29	0,08	103,96	0,41	0,43	101,57	4,59	54,71	21,83	0,186	0,025	1,75
56	Média	6,86	1712,33	858,33	0,00	277,45	300,72	0,20	11,50	0,13	193,42	0,47	0,64	175,68	6,48	74,44	46,19	0,130	0,020	4,05
57	Média	7,24	738,33	376,33	0,18	224,38	70,55	0,24	10,91	0,03	47,07	0,14	0,91	67,87	1,45	30,88	19,43	0,001	0,008	0,51
58	Média	7,17	833,00	417,00	0,12	191,69	73,34	0,09	9,54	0,04	91,55	0,56	1,06	90,49	2,28	38,03	18,28	0,191	0,015	4,83
59	Média	6,78	1295,33	648,00	0,35	553,04	115,42	0,05	3,33	0,07	94,89	0,55	1,42	138,82	2,34	69,99	74,21	0,170	0,016	2,16
66	Média	6,85	477,00	240,00	0,46	74,11	55,70	0,19	4,28	0,01	54,13	0,10	0,75	66,57	6,96	11,32	5,81	0,009	0,004	1,96
76	Média	6,54	1145,67	572,33	0,00	151,78	14,73	0,43	7,85	0,05	267,96	1,40	0,38	85,68	6,52	73,28	35,05	0,257	0,018	2,89
VMP	-	6 e 9	-	1000,00	5,00	-	250,00	-	44,28	3,28	250,00	-	1,5	200,00	-	-	-	-	-	-
VAP	-	0,0-	-	2,70	10,81	-	2,70	-	2,70	0,00	8,11	-	0,00	2,70	-	-	-	-	-	-

Cerca de 10% das amostras analisadas apresentaram turbidez acima do VMP, provavelmente em função de problemas construtivos e falta de manutenção dos poços. A condutividade elétrica (CE) varia consideravelmente, desde valores muito baixos, que refletem a infiltração direta da água da chuva, até valores extremos, indicando enriquecimento mineral da água subterrânea em determinada região da BHRI. Os valores de pH estão dentro do range esperado para águas subterrâneas, com exceção de um valor extremo igual a 8,10 no poço 31, onde o  $\text{Cl}^-$  também ocorre em concentração elevada.

A concentração de  $\text{Cl}^-$  está acima do VMP em aproximadamente 8% dos poços. Em terrenos de rochas cristalinas de áreas continentais, a presença desse íon na água subterrânea pode estar relacionada à infiltração de efluentes urbanos ou à evaporação da água que infiltra no solo. Porém, é importante observar que não há associação entre amostras com altos valores de  $\text{Cl}^-$  e de  $\text{NO}_3^-$  (Tabela 2.2), sendo este último estritamente associado a atividades antrópicas, o que desvincula, portanto, o alto  $\text{Cl}^-$  da fonte antrópica na bacia estudada.

Os mapas de distribuição espacial de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$  (Figura 2.8) mostram a baixa correlação espacial entre esses parâmetros. Os altos valores de  $\text{Cl}^-$  ocorrem sempre na porção da Média BHRI, enquanto a concentração de  $\text{NO}_3^-$  é alta em locais dispersos ao longo da bacia. Por outro lado, o  $\text{Cl}^-$  possui forte correlação positiva com o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{Ca}^{+2}$  (Tabela 2-2), que denotam origem natural por dissolução de rochas e possível enriquecimento por evaporação da água no solo. Igualmente se associam com forte correlação positiva o  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Na}^+$ , os quais também podem advir de fontes naturais como as rochas ígneas e metamórficas que compõem o arcabouço geológico da BHRI. O intemperismo de minerais silicáticos e de carbonatos, a partir de reações de troca catiônica, regulam a presença desses componentes em muitas regiões de rochas cristalinas (Subramani et al., 2010; Srinivasamoorthy et al., 2008). A presença de  $\text{Mg}^{+2}$  na água subterrânea de terrenos cristalinos costuma ser vinculada ao intemperismo de mármore dolomíticos ou de rochas máfico-ultramáficas, enquanto o  $\text{Na}^+$  pode ser atribuído ao intemperismo de feldspatos em rochas como charnoquitos e hornblenda gnaisses (Thivya et al., 2015).

O  $\text{SO}_4^{-2}$  possui concentração anômala no poço 56, construído para atender a um parque de beneficiamento de rochas ornamentais. Sua correlação é forte com o  $\text{HCO}_3^-$  (Tabela 2.2), sendo que tais componentes podem ser fornecidos por atividades de mineração ou lançamentos de esgotos, mas também por fontes naturais (Hem, 1985). Embora não existam rochas sulfetadas na área para prover  $\text{SO}_4^{-2}$  de forma significativa para a água subterrânea, importante observar

que sua correlação também é forte com o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{Mg}^{+2}$ , que são bons indicativos de fontes naturais como as rochas cristalinas.

Tabela 2.2: Matriz de correlação dos parâmetros hidroquímicos analisados (valores em negrito indicam correlação positiva forte).

	pH	CE	Turb.	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{-2}$	$\text{HPO}_4^{-2}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{+2}$
pH	1,0											
CE	0,2	1,0										
Turb.	0,4	0,4	1,0									
$\text{HCO}_3^-$	0,2	<b>0,7</b>	0,3	1,0								
$\text{SO}_4^{-2}$	0,1	<b>0,7</b>	0,1	<b>0,7</b>	1,0							
$\text{HPO}_4^{-2}$	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	1,0						
$\text{Cl}^-$	0,1	<b>0,9</b>	0,3	0,3	0,3	-0,1	1,0					
$\text{NO}_3^-$	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,1	0,1	-0,2	1,0				
$\text{Na}^+$	0,2	<b>1,0</b>	0,3	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	-0,1	<b>0,8</b>	-0,2	1,0			
$\text{K}^+$	0,2	0,5	0,3	0,2	0,3	0,0	0,4	-0,2	0,5	1,0		
$\text{Ca}^{+2}$	0,0	<b>0,9</b>	0,3	0,5	0,4	-0,2	<b>0,9</b>	-0,2	<b>0,8</b>	0,3	1,0	
$\text{Mg}^{+2}$	0,1	<b>0,8</b>	0,3	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	-0,2	0,5	-0,3	<b>0,7</b>	0,1	<b>0,7</b>	1,0

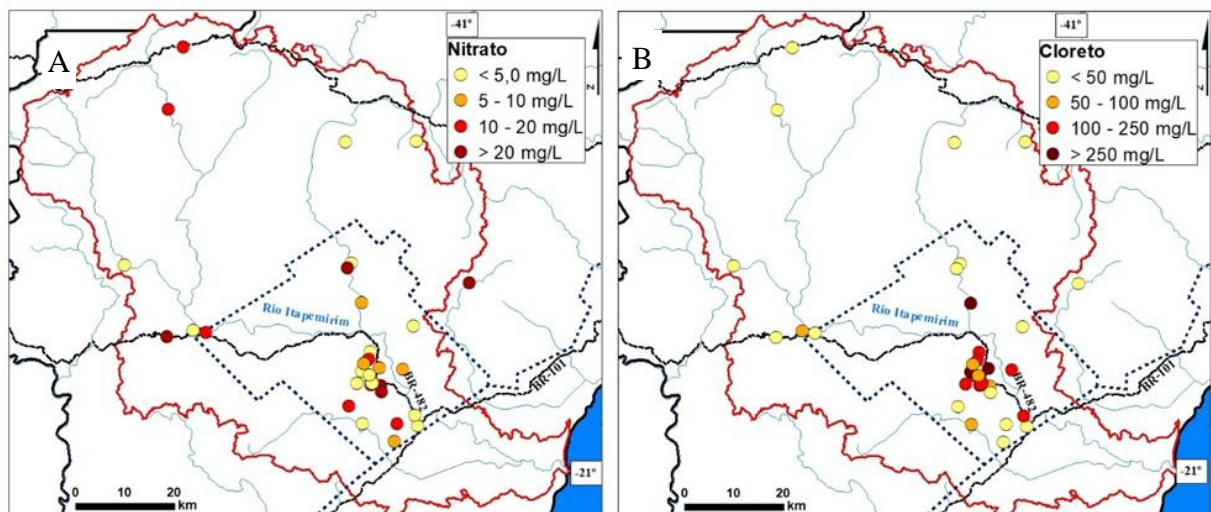


Figura 2.8: Distribuição espacial dos valores de (A)  $\text{NO}_3^-$  e (B)  $\text{Cl}^-$  na BHRI. A linha pontilhada delimita o compartimento da Média BHRI.

O  $\text{NO}_3^-$ , parâmetro determinante para a identificação de agentes antrópicos na água subterrânea, está acima do padrão de potabilidade em apenas um poço (o de número 70). Contudo, os dados obtidos são preocupantes, pois ocorrem valores acima de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  em 54% das amostras analisadas. Durante a coleta de amostras, observou-se que as características construtivas dos poços são muitas vezes precárias (como atestado pela turbidez elevada), motivo pelo qual acredita-se que a entrada de  $\text{NO}_3^-$  possa estar comprometendo a qualidade da água por infiltração de efluentes domésticos ou advindos de atividades pecuárias.



Para evitar interpretações equivocadas, as amostras com alta concentração de  $\text{NO}_3^-$  (aqui consideradas aquelas com teores acima de 10% de  $\text{NO}_3^-$  no balanço iônico) foram retiradas do conjunto de dados tratados na análise que segue, onde se busca verificar a origem dos principais constituintes iônicos de origem natural medidos na água subterrânea da BHRI.

### 2.4.3. Classificação da água subterrânea e compartimentação hidrogeoquímica

Os tipos hidroquímicos mais comuns na área são de águas bicarbonatadas sódicas (28% das amostras), bicarbonatadas mistas (19% das amostras) e mistas sódicas (19% das amostras), seguidas pelas cloretadas mistas (13% das amostras) e cloretadas sódicas (13%). Outros tipos hidroquímicos, como cloretadas magnesianas e mistas abrangem 9% das amostras (Figura 2.9). Esses tipos se agrupam em função dos setores geomorfológicos da bacia. No segmento da Alta BHRI, as proporções de cátions são mais homogêneas, com predomínio de águas bicarbonatadas mistas. Na porção da Média BHRI, a água tende a ser mais sódica e cloretada, ocorrendo, além das águas bicarbonatadas mistas, as bicarbonatadas sódicas, sódicas mistas e cloretadas mistas.

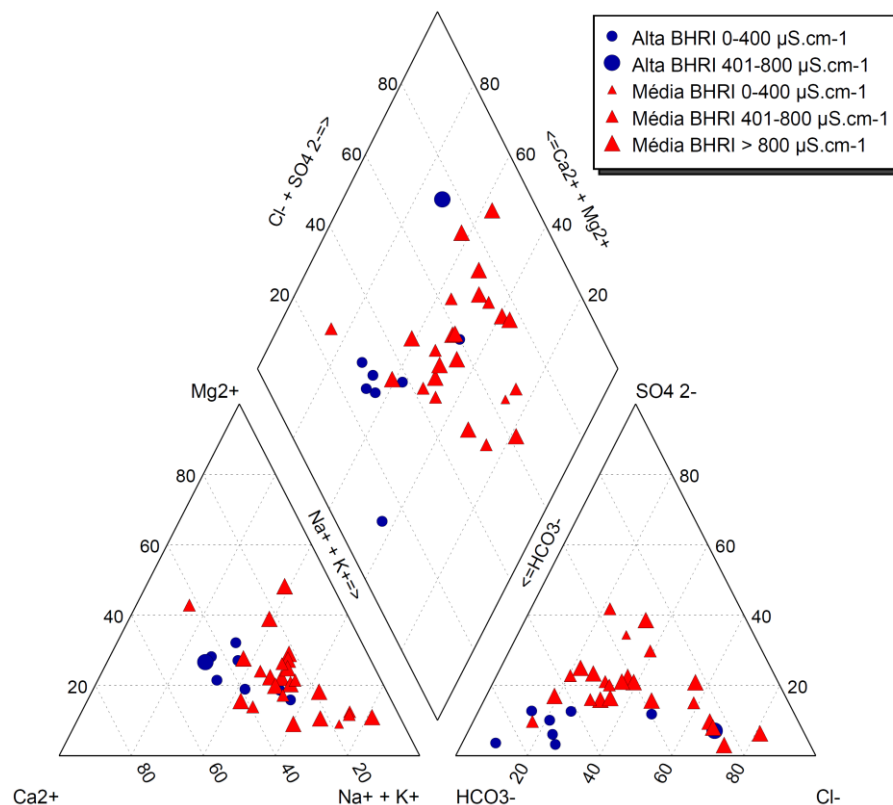


Figura 2.9: Classificação hidrogeoquímica das águas subterrâneas do meio fraturado na BHRI.

A tendência geral de mineralização da água é o incremento em íons a partir das regiões serranas, com cotas mais elevadas, para as porções topograficamente mais baixas, junto à calha do Rio Itapemirim (Figura 2.10A). Na porção Média da BHRI, que coincide com a zona climática mais seca e quente (Figura 2.3), ocorre enriquecimento mineral com valores máximos junto à área urbana de Cachoeiro de Itapemirim (Figura 2.10B). Além das características climáticas, outro fator a ser considerado como influenciador desta diferenciação hidrogeoquímica, é a presença de rochas carbonáticas e calciossilicáticas nesta porção central da bacia, onde os íons tradicionalmente advindos de rochas cristalinas, como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , são mais concentrados comparativamente à porção da Alta BHRI.

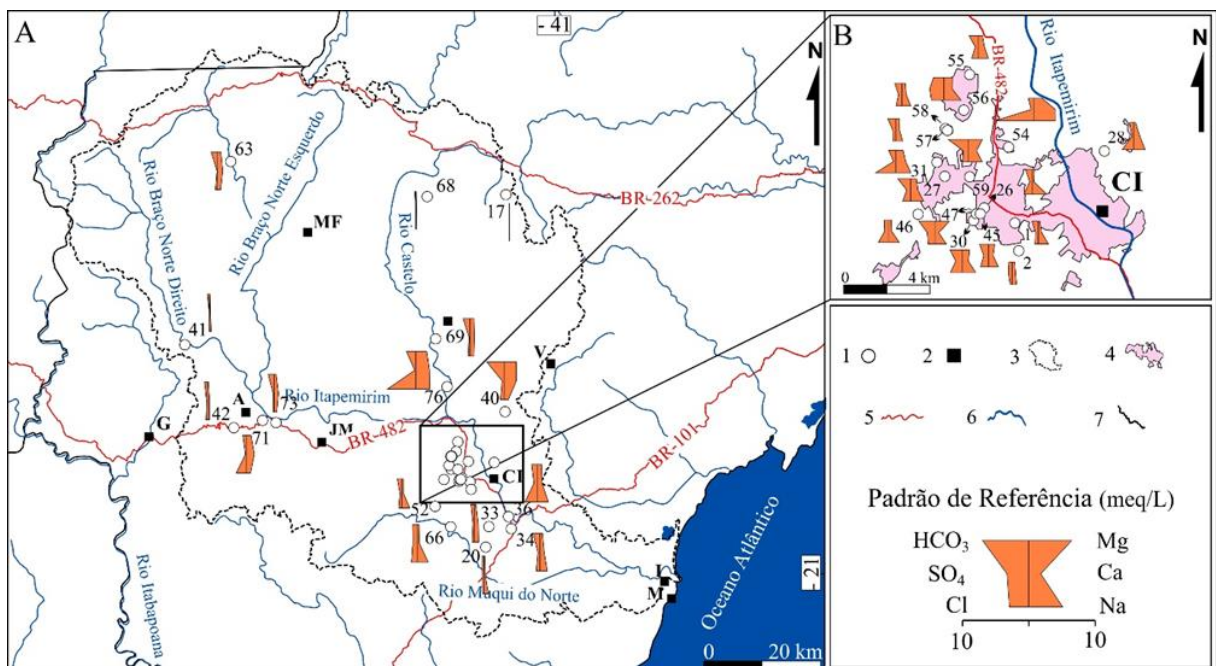


Figura 2.10: Variação espacial das características hidrogeoquímicas da água subterrânea na (A) BHRI e; (B) em Cachoeiro de Itapemirim (1 = localização dos poços; 2 = principais cidades; 3 = limite da BHRI; 4 = área urbana; 5 = principais rodovias; 6 = hidrografia; 7 = limites estaduais) (Cidades: A = Alegre, C = Castelo, G = Guaçuí, CI = Cachoeiro de Itapemirim, I = Itapemirim, JM = Jerônimo Monteiro, M = Marataízes, MF = Muniz Freire, V = Venda Nova do Imigrante).

A diferenciação hidrogeoquímica entre os setores da BHRI também pode ser observada nas relações iônicas (Figura 2.11). Os elementos alcalinos terrosos ( $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ ) são predominantes na porção da Alta BHRI, enquanto na porção Média existem as duas situações: íons alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) às vezes sobressaem, mas também há pontos com enriquecimento de alcalinos terrosos (Figura 2.11A). As relações entre  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{-2}$  e íons alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) (Figura 2.11B) também mostram a maior mineralização na água subterrânea na Média BHRI, sendo que na porção Alta os primeiros são menos presentes. Os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^-$  podem estar sendo

concentrados pelo maior tempo de residência aliado a processos de evaporação na porção mais quente e seca da bacia hidrográfica.

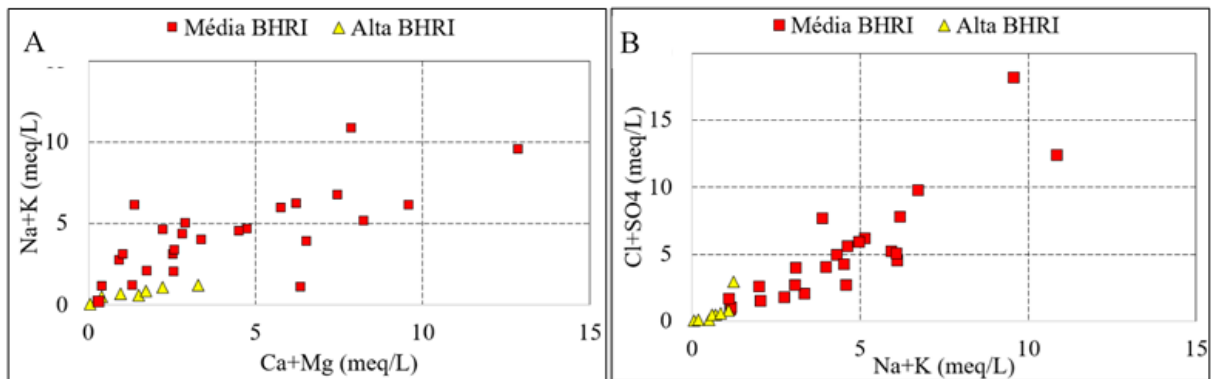


Figura 2.11: (A) Relação entre elementos alcalinos e alcalinos terrosos e (B) entre ânions e elementos alcalinos na água subterrânea coletada na Alta e Média BHRI.

Os índices geoquímicos que, de acordo com Hounslow (1995), podem indicar a origem dos íons presentes na água, foram calculados e organizados na Tabela 2.3, de acordo com a porção Alta e Média da bacia e em ordem decrescente de valores dos índices, da esquerda para a direita.

O índice  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Cl}^-)$  geralmente ficou acima de 0,5, com exceção dos poços 71, 31, 54 e 76, que apresentaram valores mais baixos (Tabela 2.3). Na classificação de Hounslow (1995), valores maiores do que 0,5 indicam que a origem do  $\text{Na}^+$  pode estar na dissolução do plagioclásio, mineral comum em terrenos granito-gnáissicos. Por outro lado, valores menores ou iguais a 0,5 indicariam dissolução de halita ou intrusão de água do mar. Como tais possibilidades não existem nesta parte da área, aventa-se a influência de águas da chuva provinda do oceano e enriquecimento por evaporação no solo. Na porção da Média BHRI, a situação topográfica provoca menores gradientes hidráulicos e as condições climáticas são mais quentes e secas do que no entorno (Figura 2.3), fatores que poderiam contribuir de maneira efetiva para a concentração mineral da água subterrânea.

O índice  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{+2})$  pode indicar o tipo de mineral que governa a composição química da água de um aquífero. Valores entre 0,2 e 0,8 apontam para enriquecimento por alteração de plagioclásio e, abaixo de 0,2, dissolução de carbonatos. A maioria das amostras coletadas na Alta BHRI pertence ao primeiro caso, enquanto na Média BHRI valores abaixo de 0,2 são mais comuns (Tabela 2.3). Nos poços situados em substrato carbonático, esse índice é menor que 0,2, comprovando a influência dos mármore na qualidade local da água subterrânea.

Tabela 2.3: Índices geoquímicos das águas coletadas em poços ao longo da BHRI.

Poço	Porção BHRI	Índice Geoquímico		
		Na / Na+Cl	Na+K-Cl / Na+K-Cl+Ca	Ca / Ca+SO4
41	Alta	0,89	0,64	0,91
73	Alta	0,70	0,32	0,81
42	Alta	0,68	0,38	0,80
69	Alta	0,65	0,32	0,81
68	Alta	0,59	0,32	0,94
63	Alta	0,59	0,19	0,91
17	Alta	0,54	0,27	0,74
71	Alta	0,29	-2,18	0,88
1	Média	0,76	0,68	0,55
57	Média	0,76	0,65	0,56
20	Média	0,74	0,73	0,38
52	Média	0,71	0,77	0,42
59	Média	0,70	0,50	0,59
2	Média	0,69	0,43	0,46
34	Média	0,67	0,49	0,68
66	Média	0,66	0,74	0,33
56	Média	0,65	0,58	0,36
33	Média	0,65	0,37	0,70
30	Média	0,64	0,56	0,35
26	Média	0,63	0,83	0,33
27	Média	0,63	0,44	0,65
58	Média	0,61	0,44	0,55
55	Média	0,61	0,38	0,66
45	Média	0,56	0,37	0,49
47	Média	0,55	0,30	0,51
46	Média	0,53	0,32	0,48
40	Média	0,51	0,03	0,84
28	Média	0,50	0,03	0,77
36	Média	0,49	-0,05	0,62
31	Média	0,43	-0,86	0,80
54	Média	0,36	-3,41	0,87
76	Média	0,34	-17,33	0,92

A relação  $\text{Ca}^{+2}/(\text{Ca}^{+2} + \text{SO}_4^{-2})$  acima de 0,5 indica dissolução de silicatos e carbonatos, enquanto valores abaixo de 0,5 em pH neutro apontam para a remoção de  $\text{Ca}^{+2}$  da solução por troca iônica ou precipitação de calcita, que é o caso predominante na área. Na Alta BHRI, essa relação ficou sempre acima de 0,5, enquanto na Média BHRI predominam valores menores que 0,5 (Tabela 2.3). Como não há fonte de  $\text{SO}_4^{-2}$  nos terrenos cristalinos da região, acredita-se que os valores

baixos desse índice na Média BHRI reflitam a reconcentração iônica por evaporação da água que infiltra no solo, associada ao maior tempo de residência, comparativamente com a porção da Alta BHRI.

Esses índices mostram, portanto, que a composição litológica também deve ser considerada como influenciadora da composição iônica da água subterrânea na porção da Média BHRI. Nesse sentido, um mapeamento geológico de detalhe seria fundamental para a prospecção hidrogeológica na região, pois os mapas disponíveis atualmente são de escala 1:400.000 (Vieira et al., 2014), 1:250.000 (Vieira, 1997) e 1:100.000 (Silva, 1993), sendo que o ideal para este tipo de análise seria um mapa em escala de, pelo menos, 1:50.000 ou de maior detalhe.

## **2.5. DISCUSSÃO**

A compartimentação geomorfológica e as condições climáticas da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) apresentam relação espacial e este condicionamento também é observado nas variações das características hidrogeoquímicas.

Na Alta BHRI predominam águas bicarbonatadas mistas, pouco mineralizadas, enquanto na Média BHRI ocorrem águas bicarbonatadas sódicas, mistas sódicas ou cloretadas mistas, com maior grau de mineralização. A porção da Alta BHRI, com relevo acidentado e manto de intemperismo pouco espesso, tende a propiciar menor tempo de residência da água subterrânea. Ao contrário, na porção da Média BHRI, o manto de intemperismo mais espesso e os declives mais suaves devem promover maior tempo de residência e maior taxa de evaporação nas zonas de recarga. Segundo Larsson (1985), a evaporação da água em infiltração no solo aumenta a concentração dos elementos dissolvidos e este é o processo que mais influencia o conteúdo salino das águas subterrâneas em terrenos de rochas cristalinas, particularmente quanto ao cloreto de sódio. Na área aqui estudada, permanece uma dúvida com relação à fonte de  $\text{Cl}^-$ , que contribui para a salinização da água subterrânea na Média BHRI, junto a outros elementos geralmente fornecidos pelo intemperismo das rochas. Há possibilidade de proveniência do  $\text{Cl}^-$  a partir de água do mar trazida pelas chuvas que, ao caírem no solo, sofrem evaporação e enriquecem a água de recarga, conforme observado em outros lugares do mundo (e.g. Stoecker et al., 2013; Neal e Kirchner et al., 2000).

A compartimentação hidroquímica observada na BHRI está de acordo com relatos de vários autores que estudam a hidrogeologia em terrenos cristalinos, onde a espessura do perfil de solo e a topografia são considerados fatores que afetam o *runoff* (ou escoamento superficial) e interferem diretamente na recarga do sistema de fraturas subjacente (e.g. Henriksen, 1995). Este sistema de fraturas pode transmitir água por grandes distâncias e é também reabastecido por meio de recarga local, a partir de circulação rasa (Bochet et al., 2020).

Outro fator relevante observado na BHRI é a tendência geral do fluxo da água subterrânea, que pode ser considerado como característico de bacias de relevo acidentado. Embora não se possa definir a potenciometria do sistema fraturado com os dados disponíveis, é possível supor que a água percola da região serrana da bacia, com cotas mais elevadas (Alta BHRI) para as porções topograficamente mais baixas e de relevo mais suave (Média e Baixa BHRI). De fato, em outros terrenos cristalinos já estudados, esse comportamento também foi observado (e.g. Robins e Smedley, 1994), indicando evolução hidrogeoquímica vinculada à posição na bacia hidrográfica. Alguns autores (Praamsma et al., 2009; Roques et al., 2014) mostram que existem sistemas de recarga local e regional em terrenos de rocha cristalina. Resultados de Boutt et al. (2010) sugerem que, neste tipo de ambiente geológico, os sistemas de fluxo ativo são rasos e a permeabilidade de fraturas decresce com a profundidade, exceto em locais com estruturas de grande escala. Assim, a recarga ocorre ao longo de áreas com manto de intemperismo, que possibilita o abastecimento e a mistura de águas com os sistemas de fraturas de circulação profunda, provenientes de locais mais distantes (Bochet et al., 2020).

Misturas de águas de diferentes regiões da bacia podem ser encontradas nos locais para onde os fluxos convergem, os quais, em termos hidrográficos, tendem a ser o eixo de drenagem principal da bacia. Tais fatores, por si só, poderiam ser apontados como responsáveis pela maior mineralização das águas na porção da Média BHRI. Porém, as condições climáticas mais quentes e secas nesta porção da bacia acentuam tais efeitos, os quais, aliados às ocorrências de rochas carbonáticas, causam as mudanças hidrogeoquímicas.

Salienta-se que esse estudo foi realizado em um ano hidrológico de pluviosidade anormalmente baixa, sendo recomendável, portanto, a continuidade do monitoramento da qualidade da água subterrânea na região.

## 2.6. CONCLUSÕES

A tendência geral da água subterrânea na BHRI é a menor mineralização nas regiões topograficamente elevadas e o aumento da concentração iônica rumo às porções mais baixas da bacia. A distribuição dos tipos hidroquímicos acompanha a compartimentação geológica e geomorfológica regional: na porção da Alta BHRI ocorrem águas bicarbonatadas mistas e, na Média BHRI, além dessas, ocorrem também as sódicas mistas, bicarbonatadas sódicas e mistas cloretadas. Na região da Alta BHRI, a composição química da água subterrânea é governada essencialmente pelo intemperismo das rochas silicáticas. Por outro lado, na Média BHRI, as características hidroquímicas são influenciadas também pela presença de rochas carbonáticas, como mármore e calciossilicáticas.

O relevo em áreas cristalinas controla o fluxo subterrâneo por gradiente hidráulico, no sentido das áreas altas (mais acidentadas) para as áreas baixas (menos acidentadas). Além do menor gradiente hidráulico, as áreas baixas têm manto de intemperismo mais espesso (nas condições climáticas da região estudada), contribuindo para o maior tempo de residência e, por consequência, maior mineralização da água subterrânea. As condições climáticas, com temperaturas mais altas e menor umidade do ar na área central da bacia, topograficamente mais rebaixada, também podem contribuir com o enriquecimento mineral em decorrência da evaporação da água que infiltra no solo.

Essas áreas menos declivosas acomodam as maiores aglomerações urbanas, aumentando as possibilidades de efeitos antrópicos que podem interferir na qualidade das águas. A associação desses fatores torna, localmente, a água subterrânea imprópria para vários tipos de uso na porção da Média BHRI e chamam a atenção para a importância da continuidade do monitoramento de sua qualidade.

### **3. CAPÍTULO III – DADOS ISOTÓPICOS DE $^{18}\text{O}$ , $^2\text{H}$ E $^3\text{H}$ PARA O ENTENDIMENTO DO SISTEMA DE RECARGA E CIRCULAÇÃO EM ROCHAS CRISTALINAS**

Neste capítulo parte dos resultados da dissertação de mestrado serão apresentados e discutidos em forma de artigo, o qual será submetido ao periódico internacional Hydrogeology Journal.

#### **Artigo II: Dados isotópicos de $^{18}\text{O}$ , $^2\text{H}$ e $^3\text{H}$ para o entendimento do sistema de recarga e circulação da água subterrânea em terrenos cristalinos no estado do Espírito Santo, Sudeste do Brasil**

**Autores:** Matheus Serri Moulin de Oliveira<sup>a</sup>, Mirna Aparecida Neves<sup>b</sup>, Fabrício de Andrade Caxito<sup>a</sup>, Rubens Martins Moreira<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Instituto de Geociências – IGc, Programa de Pós-Graduação em Geologia – PPGEOL, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>b</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde – CCENS, Departamento de Geologia – DEGEO, Alegre, ES, Brasil

<sup>c</sup>Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Nucleares – CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil

Informações do autor:

Matheus Serri Moulin de Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Contato: +5528999093808

Email: [matheusserri@hotmail.com](mailto:matheusserri@hotmail.com)

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do projeto (convênio 01.10.0808.00) e ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Nucleares – CDTN pela realização das análises de Trítio.



## RESUMO

Os isótopos  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$  têm sido utilizados para identificar padrões de recarga e circulação em sistemas aquíferos em todo o mundo, por meio do estudo de relações entre assinaturas isotópicas das águas meteóricas, subterrâneas e superficiais. Os resultados deste trabalho indicam que no sul do estado do Espírito Santo, onde as massas de ar são provenientes principalmente da massa de ar Tropical Atlântica a precipitação ocorre em condições de não equilíbrio físico-químico, com fracionamento isotópico decorrente dos efeitos da quantidade de precipitação, altitude e continentalidade, sendo a LML definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49 \delta^{18}\text{O} + 18,97$ . A assinatura isotópica da água subterrânea acompanha a da chuva, com variações de acordo com as condições climáticas de cada trecho da bacia. A porção alta da bacia contém águas com tempo de renovação de até 25,75 anos e baixa mineralização, sendo uma importante zona de recarga do Sistema Aquífero Cristalino. Nas porções mais baixas e quentes da bacia, a recarga também acontece, porém, sob influência de processos evaporativos, contendo águas mais mineralizadas e com tempo de renovação de até 85 anos que indicam proveniência de águas infiltradas a montante. A água superficial possui enriquecimento em isótopos pesados por efeito da evaporação devido à exposição solar, possuindo dados isotópicos acima da LML durante o período chuvoso e semelhantes à água subterrânea durante o período seco, evidenciando o caráter efluente dos canais de drenagem principais. Apresenta-se um modelo conceitual de circulação da água subterrânea que considera fluxos em escala local e regional, e controle da assinatura isotópica e mineralização influenciado pelo relevo, condições climáticas e diversidade litológica da bacia.

**Palavras-chave:** Isótopos estáveis, idade da água subterrânea, fluxo da água subterrânea, rochas fraturadas.

## 3.1. INTRODUÇÃO

Um tema de grande interesse em regiões sujeitas ao crescimento do uso do solo é o entendimento da comunicação entre águas superficiais e subterrâneas. Uma ferramenta bastante utilizada é o estudo de isótopos estáveis associados a dados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos para determinação de áreas de recarga potenciais (Tweed et al., 2005; Sukhija et al., 2005). Comparações entre as características hidrogeoquímicas e as razões

isotópicas  $^2\text{H}/^1\text{H}$  ( $\delta^2\text{H}$ ) e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) podem ser utilizadas para verificar a conexão entre a água superficial de rios e lagos e a água subterrânea (Clark e Fritz, 1997; West et al., 2014). Além disso, o tempo de residência e a presença de zonas favoráveis à percolação podem ser inferidos relacionando-se dados isotópicos ao grau de mineralização da água subterrânea (Salameh, 2004; Wang et al., 2020).

No Estado do Espírito Santo, Região Sudeste do Brasil, ainda não existem trabalhos a respeito da interação da água da chuva, superficial e subterrânea através de dados de isótopos estáveis ( $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ ) e Trítio ( $^3\text{H}$ ). Esta região vivenciou, durante os anos de 2014 a 2016, um forte período de escassez hídrica, fazendo com que a população intensificasse a busca por água subterrânea por meio de poços tubulares profundos no Sistema Aquífero Cristalino. O entendimento da recarga e circulação da água subterrânea em terrenos de rocha cristalina aplicando-se dados isotópicos tem sido utilizado para delimitação de áreas de recarga potenciais (e.g. Rose 1992; Abbott et al. 2000; Wang et al. 2020), fornecendo uma importante base para a redução de perdas com perfurações de poços malsucedidas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) é o principal deflúvio controlador da descarga superficial e subterrânea na área de estudos. Por este motivo, os resultados gerados neste trabalho serão de grande importância para o desenvolvimento socioeconômico da região sob bases sustentáveis. O objetivo do trabalho é determinar, a partir de isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ ), do Trítio ( $^3\text{H}$ ) e grau de mineralização, padrões de comunicabilidade entre as águas pluviais, superficiais e subterrâneas em terrenos de rochas cristalinas, buscando identificar o sistema de recarga e o fluxo subterrâneo na área.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1. Área de estudos**

#### **3.2.1.1. Contexto geológico e hidrogeológico**

A Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI) está localizada na região Sudeste do Brasil, no sul do Estado do Espírito Santo (Figura 3.1). A região está incluída no domínio geotectônico

da Província Mantiqueira, na zona sul do Orógeno Araçuaí (Heilbron et al., 2004; Gradim et al., 2014). Compreende terrenos do Embasamento Cristalino pré-cambriano, composto essencialmente por rochas metamórficas como gnaisses, migmatitos, charnoquitos e milonitos, com ocorrências locais de mármore e rochas calciossilicáticas, além de intrusões ígneas granitoides e gabroicas de idade máxima cambriana (Vieira, 1997; Vieira et al., 2014) e diques cambrianos e cretáceos (Santiago et al., 2020). Ocorrem também, de forma mais restrita, coberturas sedimentares neogênicas da Formação Barreiras, e quaternárias, compostas principalmente por aluviões e sedimentos litorâneos (Figura 3.2A).

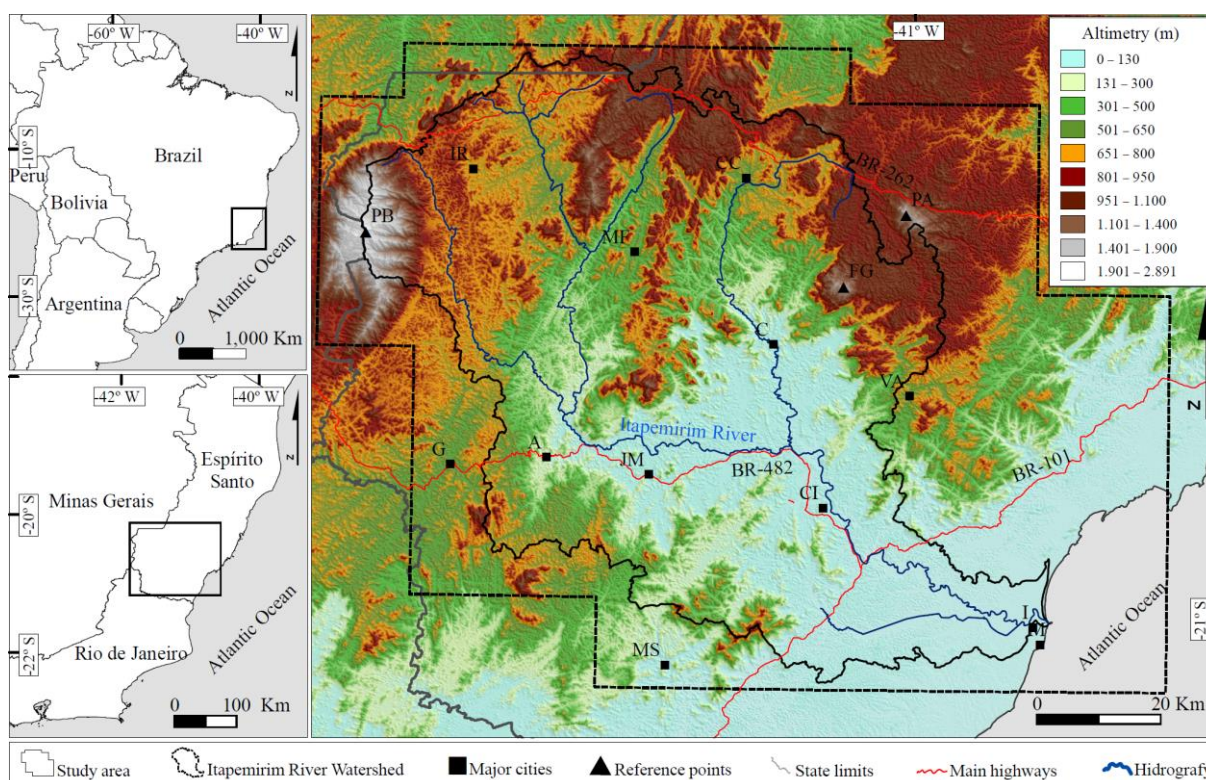


Figura 3.1: Localização da área de estudos. Principais cidades (A: Alegre, CI: Cachoeiro de Itapemirim, C: Castelo, CC: Conceição do Castelo, G: Guaçuí, I: Itapemirim, IR: Irupi, JM: Jerônimo Monteiro, M: Marataízes, MF: Muniz Freire, MS: Mimoso do Sul, V: Venda Nova do Imigrante, VA: Vargem Alta) e pontos de referência (PB: Pico da Bandeira, PA: Pedra Azul, FG: Forno Grande). Imagem ASTER GDEM v3 (NASA e METI, 2013).

A área é dividida em três setores morfoestruturais, nomeados Mantiqueira, Cachoeiro e Litorâneo por Peixoto-Oliveira et al. (2018) e referidos aqui, respectivamente, como porções da Alta, Média e Baixa BHRI (Figura 3.2B). Na porção da Alta BHRI, predominam as rochas gnáissicas e granitoides compondo um relevo escarpado de morros, morrotes e serras. Estruturas geológicas como foliação, extensas zonas de cisalhamento e zonas fraturadas controlam o relevo, onde são comuns os vales encaixados com ocorrências restritas de sedimentos aluviais. A Média BHRI é caracterizada pela menor altitude com relação ao seu

entorno, com mares de morros e vales aplainados. Nesta porção, além das rochas granito-gnáissicas, ocorrem as lentes de mármore e rochas calciossilicáticas e a presença dos sedimentos aluviais é mais proeminente. A Baixa BHRI é constituída por rochas gnáissicas, grande parte delas coberta pelos cenozoicos; as formas do relevo são suaves, com morros, colinas, tabuleiros e áreas planas.

A água subterrânea da BHRI é armazenada em dois sistemas aquíferos: o Fraturado, que compõe cerca de 88% da bacia, e o Sedimentar (Oliveira et al., 2020). O Sistema Aquífero Fraturado é formado pelas rochas do embasamento cristalino e o manto de intemperismo sobrejacente, enquanto o Sistema Aquífero Sedimentar é composto pelos sedimentos semi-consolidados da Formação Barreiras e os inconsolidados dos depósitos aluviais e litorâneos (Figura 3.2A).

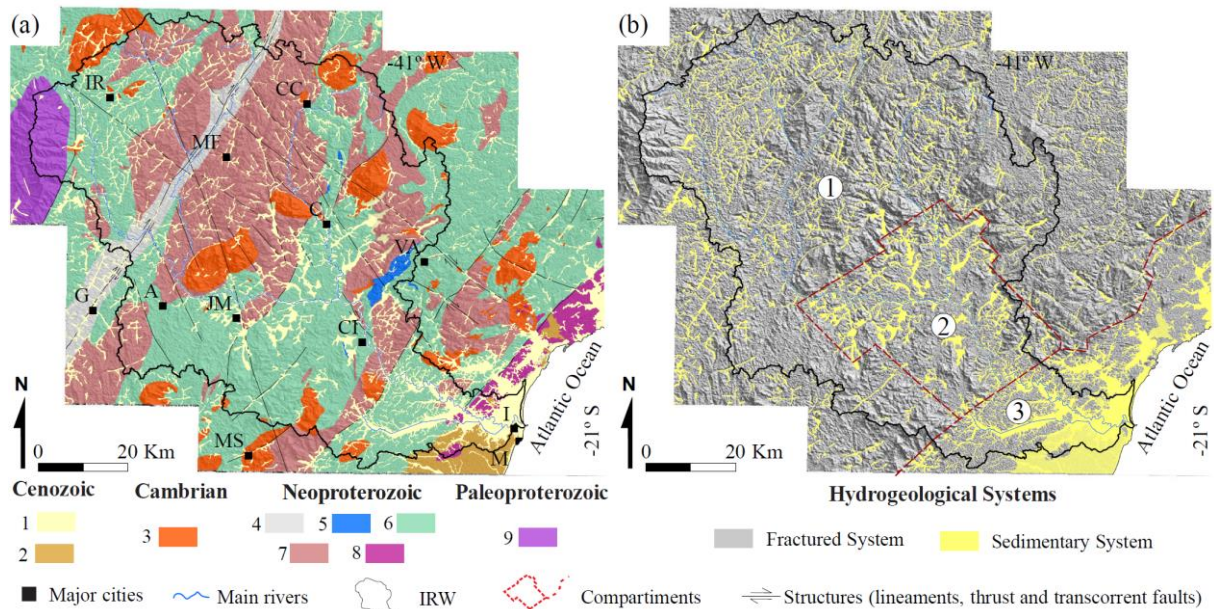


Figura 3.2: (A) Mapa geológico simplificado (baseado em Vieira 1997 e Vieira et al. 2014). Imagem ASTER GEDEM v3 (NASA e METI, 2013). (Litologia = 1: Sedimentos fluviais e costeiros; 2: Formação Barreiras; 3: Granitoides; 4: Gnaisses miloníticos; 5: Mármore; 6: Paragnaisses; 7: Ortognaisses; 8: Chanockitos; 9: Granulitos); (B) Unidades hidrogeológicas da BHRI (Setores = 1: Alta BHRI; 2: Média BHRI; 3: Baixa BHRI).

### 3.2.1.2. Pluviosidade e clima

A Região Sudeste do Brasil está sob influência da Massa Equatorial Continental (mEc: quente e úmida, formada na Floresta Amazônica) no verão e da Massa Tropical Atlântica (mTa: quente

e úmida, formada no Oceano Atlântico) em todo o ano, mas especialmente no inverno (Strahler, 1951; Zandonadi, 2015) (Figura 6.1 do material suplementar).

O clima da região é Tropical, influenciado pelo relevo. As porções montanhosas da bacia são mais frias e chuvosas, enquanto a porção central é mais quente e seca. O mapa climático da área (SEPLAN, 1999) mostra a existência de terras quentes (com temperatura média do mês mais frio de 11,8 °C e temperatura média do mês mais quente de 34,0 °C), de temperaturas amenas (9,4 e 30,7 °C) e de terras frias (7,3 e 27,8 °C), em associação com terras secas, transicionais e chuvosas (Figura 6.2 do material suplementar). As áreas de ocorrência desses subtipos climáticos são controladas pela compartimentação geomorfológica apresentada na Figura 3.2B.

Os padrões de precipitação da área mostram que a região possui duas estações bem definidas: a chuvosa, nos meses de novembro a abril, e a seca. A média anual de precipitação é de 1336 mm. A determinação destes padrões foi feita com base em dados de 1956 a 2018 de 14 estações pluviométricas (ANA, 2020) (Figura 3.3A).

### **3.2.2. Análises de isótopos estáveis: Oxigênio 18 ( $^{18}\text{O}$ ) e Deutério ( $^2\text{H}$ )**

As medições de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LAIS) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília – UnB, através do espectrômetro de massa Picarro L2120-i. A determinação da assinatura isotópica pluvial foi feita a partir de 347 medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  referentes a coletas mensais de água de chuva realizadas durante os anos de 2013 a 2016, em 20 estações de coleta (Figura 3.3B).

Também foram obtidas no período de 2013 a 2016, 103 medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  da água subterrânea coletada em 46 poços tubulares profundos (Figura 3.3C). A assinatura isotópica da água superficial foi obtida a partir da análise de 40 amostras, coletadas trimestralmente em 2016, em 10 pontos em córregos de cabeceira e no Rio Itapemirim (Figura 3.3D).

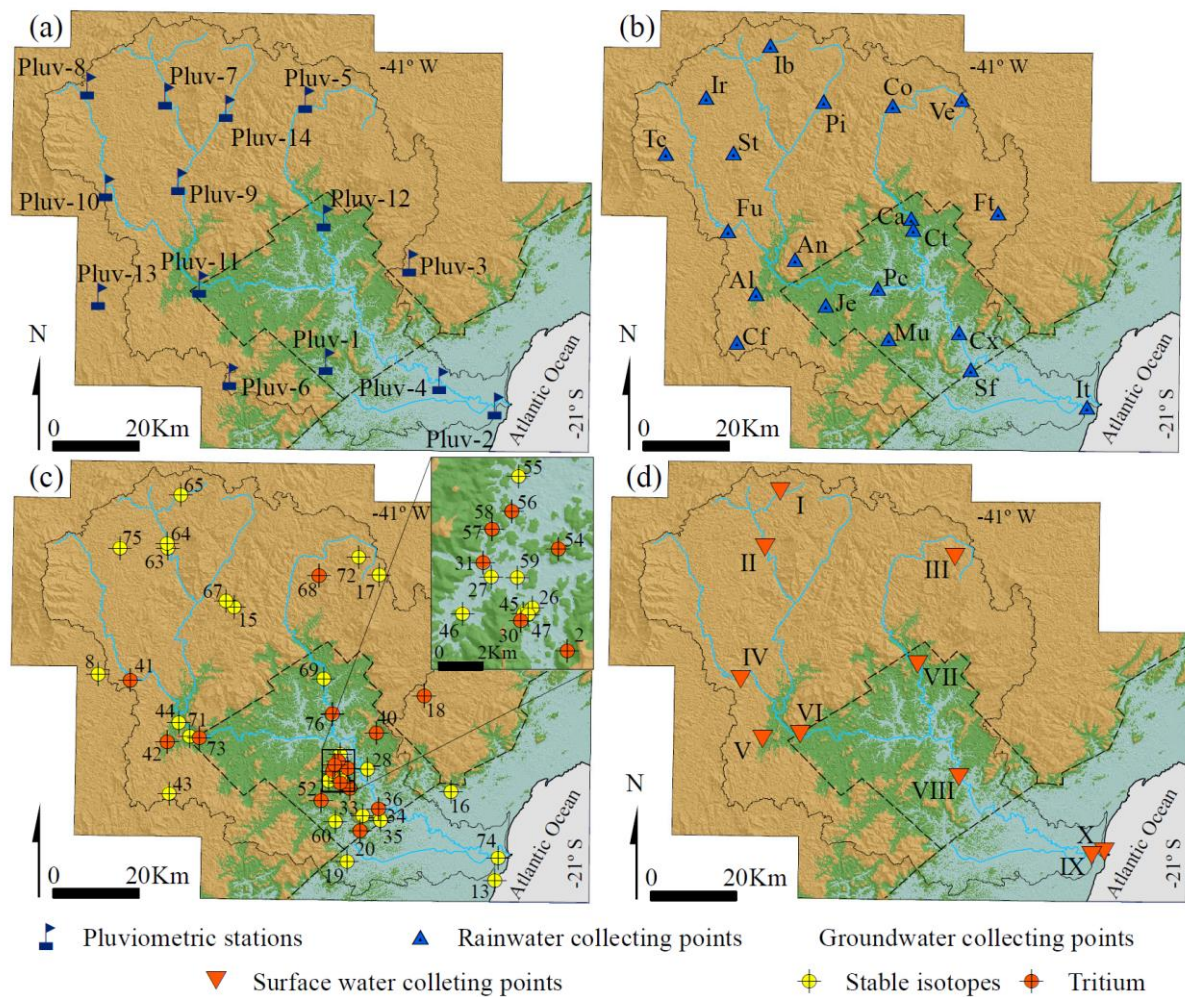


Figura 3.3: (A) Localização das estações meteorológicas (Pluv: Estações pluviométricas); (B) Estações de coleta da água da chuva (Al: Alegre, An: Santa Angélica, Ca: Castelo, Cf: Café, Co: Conceição do Castelo, Ct: Castelo, Cx: Cachoeiro de Itapemirim, Ft: São José da Fruteira, Fu: Cachoeira da Fumaça, Ib: Ibitirama, Ir: Irupí, It: Itapemirim, Je: Jerônimo Monteiro, Mu: Muqui, Pi: Piaçú, Pc: Pacotuba, Sf: Safra, St: Santíssima Trindade, Tc: Tecnotruta, Ve: Venda Nova do Imigrante); (C) Poços tubulares profundos de coleta de água subterrânea; e (D) Pontos de coleta de água superficial.

### 3.2.3. Análises de Trítio ( $^3\text{H}$ )

As amostras para análises de  $^3\text{H}$  foram feitas evitando-se o máximo o contato intenso da água com ar, sendo armazenadas em frasco âmbar de 1L e preservadas em ambiente refrigerado. As análises foram realizadas no Laboratório de Trítio Ambiental (LTA) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). A determinação de seu teor nas amostras de águas subterrâneas foi executada pelo enriquecimento eletrolítico e posterior contagem de emissões das radiações  $\beta^-$  pelo  $^3\text{H}$  usando um espectrômetro de cintilação líquida de ultrabaixo *background* Quantulus 1220.

A datação a partir do  $^3\text{H}$  envolveu a determinação da idade absoluta da água subterrânea (tempo de renovação) através do método matemático denominado Modelo de Renovação Exponencial (MRE). Este modelo assume que cada componente da água subterrânea, ao longo de seu sistema de fluxo, recebe a mesma contribuição ponderada da precipitação da zona de recarga ao longo dos anos, fazendo com que as águas possam ser constituídas por parcelas de diferentes idades (Appelo e Postma, 2006; Jurgens et al., 2012).

A definição do tempo de renovação, considera a entrada das parcelas de  $^3\text{H}$ , mistura de múltiplos anos e o decaimento radioativo durante o trânsito na zona de recarga até o aquífero (Clark e Fritz, 1997), sendo dependente do tempo de residência da água subterrânea, como pode ser visto na Equação 3-1.

$$C_{out}(t) = \sum_{t'=-\infty}^{t-\Delta t} C_{in}(t') \frac{1}{\tau_s} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau_s} + \lambda} \cdot \left\{ e^{[-(\frac{1}{\tau_s} + \lambda) \cdot (t - t' - \Delta t)]} - e^{[-(\frac{1}{\tau_s} + \lambda) \cdot (t - t')] } \right\} \quad (3-1)$$

Onde:

$C_{out}$  = concentração de Trítio na amostra, no tempo  $t$  em que foi realizada a análise;

$C_{in}$  = concentração de Trítio no momento da infiltração;

$\lambda$  = constante de decaimento radioativo do  $^3\text{H}$  (equivale a  $\frac{\ln 2}{12,32}$ , em anos<sup>-1</sup>);

$\tau$  = tempo de residência da água subterrânea (em anos); e

$(t - t')$  = tempo transcorrido desde a infiltração da parcela de fluxo com concentração  $C_0$  até o momento de coleta para análise (em anos).

Foram analisadas 14 amostras de água subterrânea coletadas em agosto de 2018, em poços tubulares profundos penetrantes no Sistema Aquífero Cristalino. Esses poços estão incluídos, também, na rede de monitoramento dos isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ). Como não existe um histórico de monitoramento de  $^3\text{H}$  para águas pluviais da BHRI, foram utilizados valores diretos de estações próximas à área, como é o caso de Rio de Janeiro e Salvador. Para o restante dos anos, foram utilizadas concentrações estimadas de  $^3\text{H}$ , a partir de diferentes fatores de correção relacionados às estações Porto Alegre (Brasil), Gough, Kaitoke (Nova Zelândia), Bogotá (Colômbia) e outras do Hemisfério Norte (IAEA, 2020). Foi elaborada a curva de concentração do  $^3\text{H}$  *versus* tempo ajustando os parâmetros da equação do modelo exponencial aos valores corrigidos de  $^3\text{H}$  nas chuvas.

### 3.3. RESULTADOS

#### 3.3.1. Variações da pluviosidade na BHRI

A Figura 3.4A mostra que existe uma diferença significativa de pluviosidade entre cada setor da bacia. A média da precipitação na Alta BHRI é 1.419 mm, na Média BHRI é 1.244 mm, e a Baixa BHRI possui o menor índice de precipitação, chegando apenas a 1.066 mm. Isso possivelmente decorre das diferentes massas de ar que circulam sobre o Sudeste do Brasil nos períodos de inverno e verão (Figura 6.1 do material suplementar) e pode ser visto no padrão de inversão de precipitação durante o período seco, com mais chuva na Baixa BHRI do que nos demais setores.

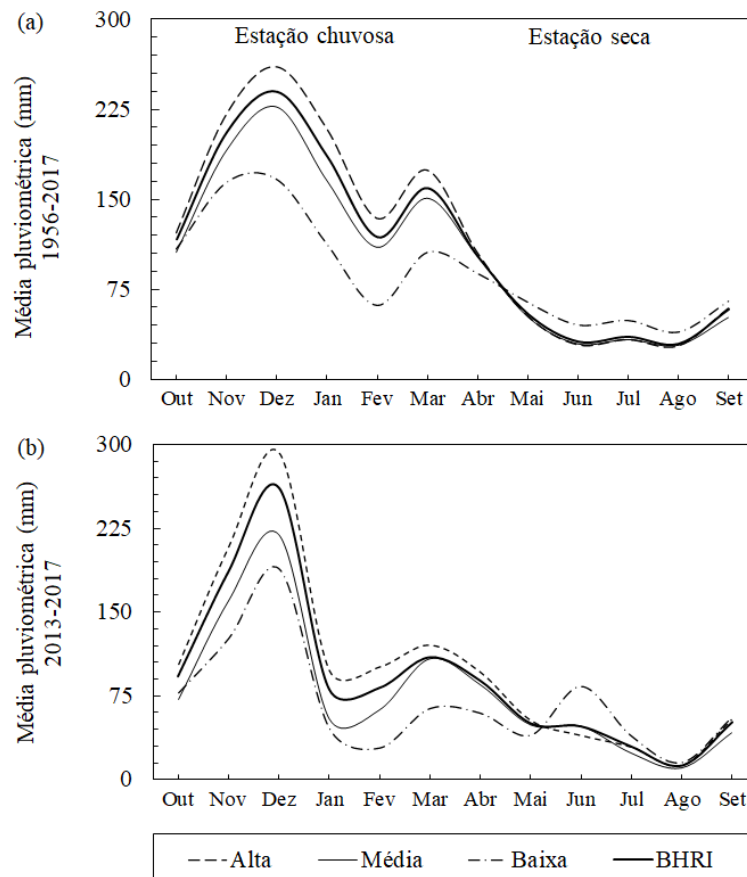


Figura 3.4: Padrões de precipitação na BHRI: (A) durante a série histórica completa (1956 a 2017); e (B) no período da amostragem (2013 a 2017).

As variações da pluviosidade nos setores da bacia também estão relacionadas às diferenças geomorfológicas, pois, como observado na Figura 6.2 (material suplementar), há uma



compartimentação do clima entre as zonas mais altas, que são mais frias e úmidas, e as zonas baixas, que são mais quentes e secas.

É preciso destacar que a amostragem de água de chuva para análise isotópica neste trabalho ocorreu entre novembro de 2013 e fevereiro de 2017, período de forte estiagem em toda região Sudeste do Brasil (Figura 3.4B). Esse comportamento intensificou o efeito de sazonalidade do clima na bacia, ocorrendo períodos curtos de chuvas fortes e longas estiagens nos meses subsequentes.

### 3.3.2. Assinatura isotópica da água da chuva

Os dados de isótopos estáveis de água da chuva coletada na BHRI (Tabela 6.1 do material suplementar) foram comparados com a linha meteórica global (LMG) de Rozanski et al., (1993), definida pela Equação 3-2.

$$\delta^2\text{H} = 8,13\delta^{18}\text{O} + 10,80 \quad (3-2)$$

A linha meteórica local (LML) da BHRI foi definida neste trabalho pela Equação 3-3 (Figura 3.5A), com coeficiente de correlação  $R^2=0,95$ .

$$\delta^2\text{H} = 8,49\delta^{18}\text{O} + 18,97 \quad (3-3)$$

O valor alto do coeficiente linear da LML mostra que ocorre o fracionamento isotópico em condição de não equilíbrio, pois, durante a condensação e precipitação das massas de ar, há sucessivos processos de evaporação e reincorporação na fase vapor que adentra o continente (Clark e Fritz, 1997). Como os fracionamentos para o  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  em condições de não equilíbrio são ligeiramente diferentes, há um aumento relativo do  $^2\text{H}$  na fase líquida remanescente, o que denota o excesso de Deutério observado na LML.

Na porção da Alta BHRI, a assinatura isotópica segue a Equação 3-4:

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = 8,60\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 19,90 \quad (3-4)$$

Os setores da Média e Baixa BHRI possuem padrões similares e são representados pela Equação 3-5:

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = 8,21\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 16,96 \quad (3-5)$$

Na medida em que se afasta da linha de costa, o excesso de deutério das linhas meteóricas aumenta (Figura 3.5B), indicando que, além da evaporação, o distanciamento do litoral, os maiores índices pluviométricos, o aumento da altitude e as temperaturas mais baixas nas porções mais continentais da bacia também favorecem um maior fracionamento isotópico das massas de ar.

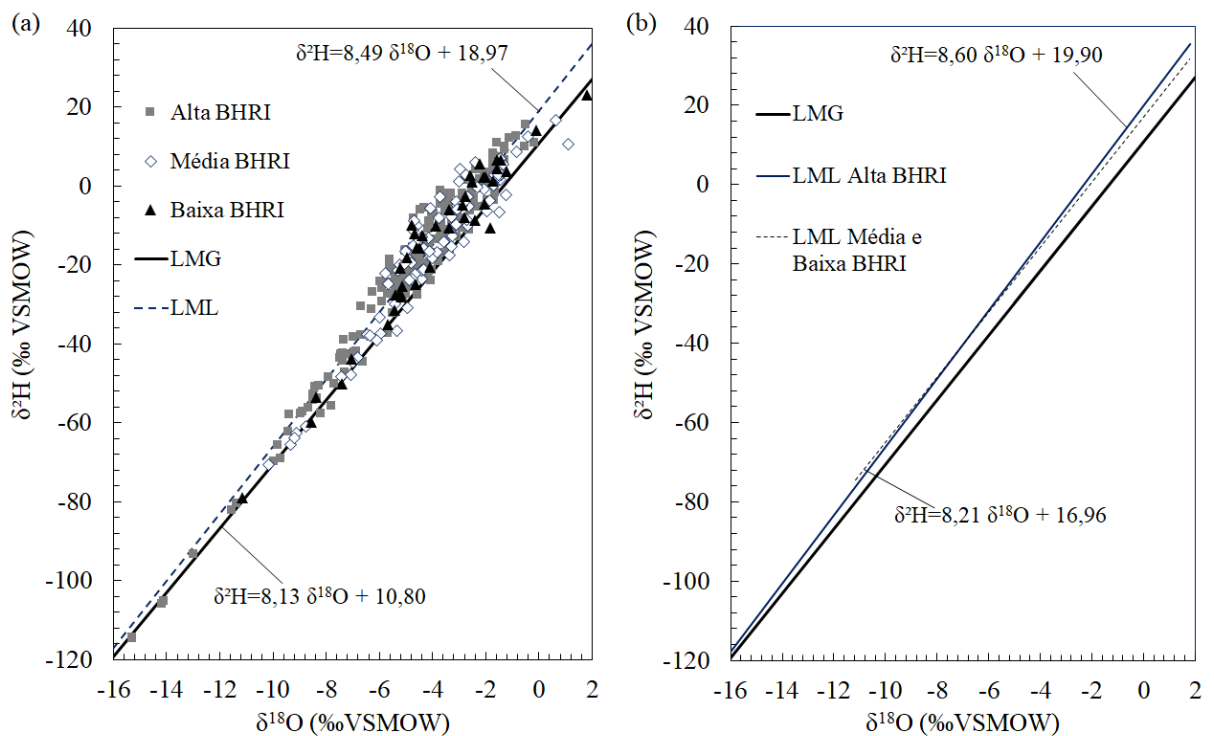


Figura 3.5: (A) Linha meteórica local (LML) da BHRI e Linha meteórica global (LMG); (B) LML's dos diferentes compartimentos da BHRI.

### 3.3.2.1. Efeito da quantidade de precipitação

Os dados isotópicos plotados no gráfico da Figura 3.6 são referentes às médias dos desvios de  $\delta^{18}\text{O}$ ‰ e de  $\delta^2\text{H}$ ‰ de cada mês envolvendo todos os pontos de coleta da água de chuva. Nota-se a tendência de empobrecimento de isótopos pesados durante os meses chuvosos (verão) e enriquecimento nos períodos de seca (inverno). Dansgaard, (1964) classifica esse comportamento como efeito da quantidade de precipitação.

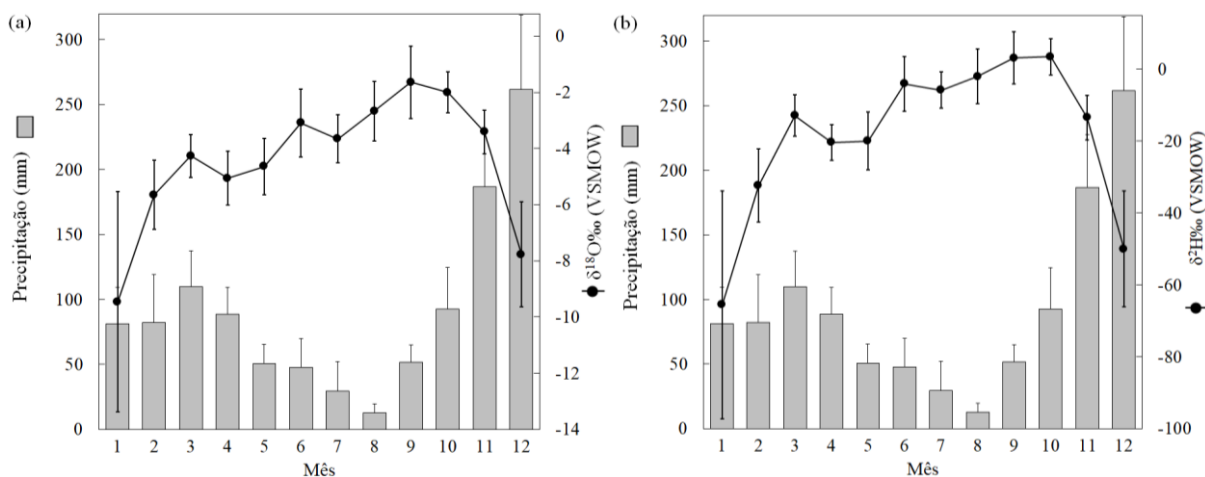


Figura 3.6: Efeito da quantidade da precipitação na BHRI. Comparação das médias mensais de precipitação com: (A)  $\delta^{18}\text{O}$ ; e (B)  $\delta^2\text{H}$ .

O desvio padrão elevado no mês de janeiro é devido aos distintos índices de precipitação registrados ao longo do período monitorado, quando a quantidade de chuva ficou próxima à média histórica em 2013, mas muito abaixo nos anos de 2015 e 2016. Como a quantidade de precipitação influencia diretamente no fracionamento isotópico, para este mês ocorre uma extensa faixa de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .

Conforme esperado, a diminuição das chuvas em março (em relação ao padrão normal da região) contribuiu com a atenuação da anomalia negativa dos desvios. Além disso, o maior volume de chuvas no mês de junho (anomalia de chuvas no período seco) favoreceu o empobrecimento em isótopos pesados no mês subsequente.

### 3.3.2.2. Efeito da continentalidade e altitude

Segundo Clark e Fritz, (1997), a precipitação ocorre quando uma massa de vapor adentra no continente, esfriando adiabaticamente a medida em que altitude do terreno aumenta. Essa diminuição de temperatura dificulta a manutenção das massas de ar nas regiões mais altas, favorecendo a precipitação e tornando as massas de ar gradativamente empobrecidas em isótopos pesados nas regiões mais distantes do litoral (efeito da continentalidade) e mais altas (efeito da altitude).

Os valores médios de  $\delta^{18}\text{O}$  da água de chuva na BHRI mostram que existe uma diminuição de  $-0,3\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}$  e de  $-2,4\text{‰}$   $\delta^2\text{H}$  quando há elevação de 100 metros na altitude (Figura 3.7A).

Observe que há dois agrupamentos marcados pelas estações que estão abaixo ou acima da cota 400 m. Essa elevação marca a transição do setor médio para o alto da bacia, onde os desvios de  $\delta^{18}\text{O}$  passam a ser menores que  $-4,5\%$  e evidencia a ocorrência do efeito da altitude. A Figura 3.7B mostra a ocorrência do efeito da continentalidade, em que as estações distantes do litoral são mais empobrecidas em isótopos pesados que naquelas próximas do litoral.

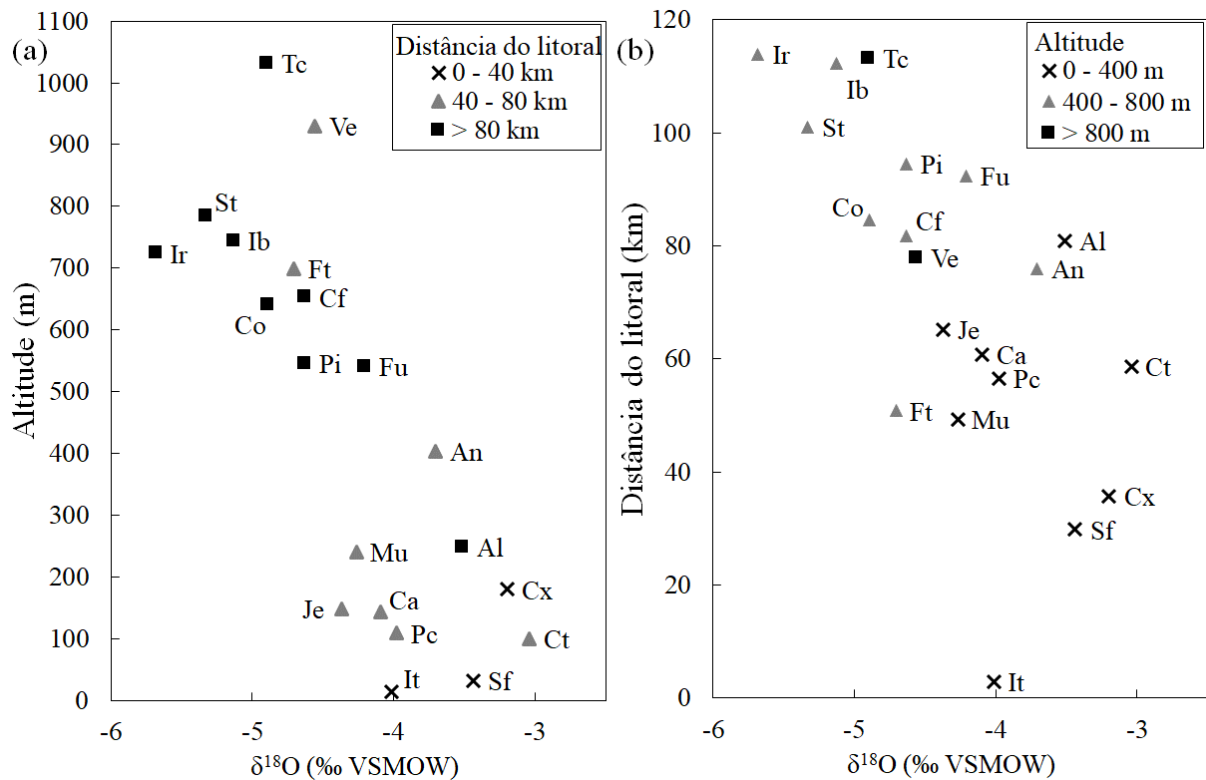


Figura 3.7: Efeitos da: (A) Altitude; e (B) distância do litoral no fracionamento isotópico da água da chuva.

É importante destacar que, apesar da ocorrência dos dois efeitos, existem peculiaridades nos resultados de algumas estações de coleta, principalmente condicionadas à variação abrupta de altitude na bacia, controlada pela compartimentação morfoestrutural. Este caso acontece na estação Ft que, apesar de estar próxima ao litoral, é empobrecida em  $\delta^{18}\text{O}$  por conta da altitude. A altitude por si só não é determinante, tendo em vista que as estações Ir, St e Ib (estações da Alta BHRI), apesar de não serem as mais elevadas, são as mais distantes do litoral e, portanto, são mais empobrecidas isotopicamente. A altitude também parece não ser tão importante nas estações Tc e Ve, que por estarem em porções topograficamente elevadas, esperava-se maior depleção de  $\delta^{18}\text{O}$ . Segundo a Figura 3.7B, parece que a distância do litoral é o fator que mais influencia os desvios isotópicos.

O mesmo acontece para algumas estações da Média BHRI. As estações Je, Ca, Mu e Pc, apesar da baixa altitude, estão na zona de transição para a Alta BHRI (mais distantes do litoral), o que favorece o maior fracionamento isotópico.

Outra particularidade na área é o empobrecimento percebido na estação It, que é a mais próxima do litoral. Possivelmente, o maior fracionamento da água da chuva nesta localidade está relacionado ao efeito da quantidade de precipitação decorrente da inversão pluviométrica que ocorre no período seco, quando chove mais na porção da Baixa BHRI do que nos demais setores da bacia.

### 3.3.3. Assinatura isotópica da água subterrânea

A assinatura isotópica de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^2\text{H}\text{‰}$  da água subterrânea mostra que os desvios seguem uma linha de evaporação conforme a Equação 3-6:

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = 5,78\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 2,67 \quad (3-6)$$

A maioria dos poços da região alta e parte dos poços porção média e baixa da bacia plotam sobre ou próximos à linha meteórica local (agrupamento A). Alguns poços, como o 8, 43, 64 e o 65, cujas amostras foram coletadas no período chuvoso e possuem condutividade elétrica média inferior a  $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Tabela 3.1), são plotadas acima da LML (agrupamento i), indicando rápida infiltração de água meteórica empobrecida em isótopos pesados (Figura 3.8).

A altitude, as temperaturas mais baixas e os maiores índices pluviométricos da Alta BHRI diminuem os efeitos de evaporação da água pluvial enquanto é infiltrada no sistema hidrogeológico, causando a similaridade da assinatura da água subterrânea com a LML. Boa parte dos desvios isotópicos das amostras de água subterrânea da Média BHRI também são plotados sobre a LML, contudo, comparativamente, essas são mais enriquecidas em isótopos pesados que as águas da Alta BHRI. Isso possivelmente está relacionado ao fato das águas pluviais que incidem sobre esta porção da bacia serem isotopicamente mais enriquecidas em isótopos pesados (Figura 3.7B). Parte das amostras da água subterrânea na Média BHRI também está abaixo da LML (agrupamento B na Figura 3.8), indicando evaporação e evidenciando a influência do clima mais quente nesse trecho da bacia. Os desvios isotópicos da

água subterrânea dos poços da Baixa BHRI plotam, em maioria, no agrupamento A na Figura 3.8, próximo à LML, o que é ligado a possível infiltração rápida das águas pluviais.

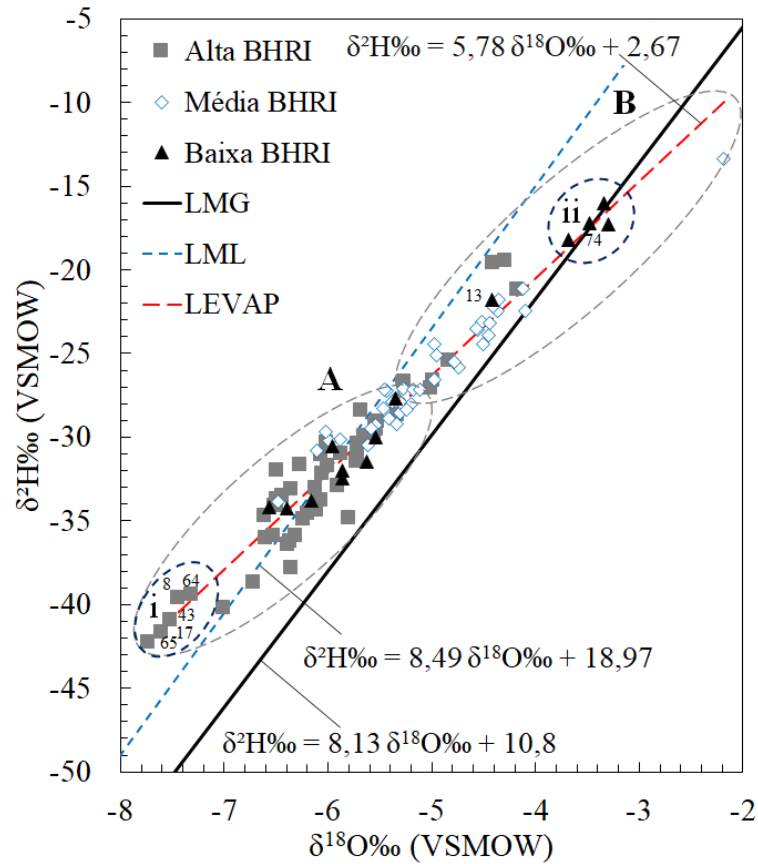


Figura 3.8: Assinatura isotópica da água subterrânea na BHRI.

Uma amostra da água do poço 13 está no agrupamento B, referente à coleta realizada em período seco. Essa diferença no padrão mostra enriquecimento em isótopos pesados possivelmente por influência da proximidade deste poço com o Oceano Atlântico. O poço 74 (agrupamento ii na Figura 3.8), perfurado no Sistema Aquífero Sedimentar, está situado muito próximo à foz do Rio Itapemirim. Todas as amostras coletadas neste poço mostraram enriquecimento em isótopos pesados, possivelmente por influência da interação entre a água subterrânea e a água do Rio Itapemirim, que em sua porção mais distal é mais enriquecida em  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ .

Tabela 3.1: Composição isotópica e condutividade elétrica na água subterrânea (valores médios).

Porção da BHRI	Poço	$\delta^2\text{H}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	d‰	CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
Alta	8	-36,3	-6,67	17,08	34,4
	15	-30,6	-5,80	15,80	53,2
	17	-33,5	-6,18	16,00	14,2
	18	-29,3	-5,88	17,71	70,1
	41	-30,0	-5,62	15,00	93,2
	42	-28,7	-5,39	14,41	180,8
	43	-40,9	-7,52	19,19	45,5
	63	-35,0	-6,29	15,31	218,8
	64	-39,4	-7,32	19,15	72,2
	65	-38,3	-6,83	16,34	76,5
	67	-28,7	-5,33	13,97	131,4
	68	-34,1	-6,51	17,96	55,4
	69	-27,6	-5,28	14,66	309,7
	71	-31,5	-5,72	14,28	497,0
	72	-34,4	-6,49	17,52	200,2
75	-34,9	-5,80	11,52	57,8	
Média	2	-21,2	-4,17	12,19	493,0
	16	-33,8	-6,07	14,73	86,5
	19	-19,6	-4,40	15,66	-
	20	-29,7	-6,02	18,48	183,0
	26	-30,8	-6,11	18,09	-
	27	-33,9	-6,48	17,95	1300,6
	28	-25,1	-4,96	14,58	836,2
	30	-27,2	-5,43	16,20	1364,2
	31	-30,1	-5,88	16,93	1583,2
	33	-27,7	-5,35	15,12	328,2
	34	-28,6	-5,31	13,92	386,7
	35	-13,4	-2,18	4,07	230,5
	36	-23,6	-4,56	12,91	683,7
	40	-23,1	-4,51	13,02	766,8
	44	-34,7	-6,61	18,21	329,3
	45	-31,8	-6,00	16,22	1274,5
	46	-31,0	-5,87	15,94	983,2
	47	-24,9	-4,77	13,27	1550,8
	52	-25,8	-4,74	12,14	448,3
	54	-21,9	-4,31	12,60	2510,0
55	-28,9	-5,41	14,40	1041,3	
56	-30,2	-5,99	17,70	1712,3	
57	-29,3	-5,55	15,10	738,3	
58	-25,5	-4,75	12,50	833,0	
59	-23,9	-4,45	11,70	1295,3	
60	-28,5	-5,50	15,48	614,5	
73	-28,6	-5,34	14,11	257,7	
76	-22,4	-4,10	10,41	1145,7	
Baixa	13	-32,5	-5,98	15,32	227,7
	74	-17,2	-3,45	10,43	445,2

Como a maior parte dos poços da alta bacia possuem águas com assinatura isotópica próxima à da água da chuva, é possível que a infiltração nessa porção da bacia seja rápida e que o aumento da condutividade elétrica esteja condicionado à variação do tempo de residência no aquífero. Na média bacia, embora a assinatura isotópica da água subterrânea de alguns poços seja parecida com a da água da chuva, uma série de amostras plotam abaixo da LML, possuindo também extensa faixa de condutividade elétrica independente do desvio isotópico de  $^{18}\text{O}$  (Figura 3.9).

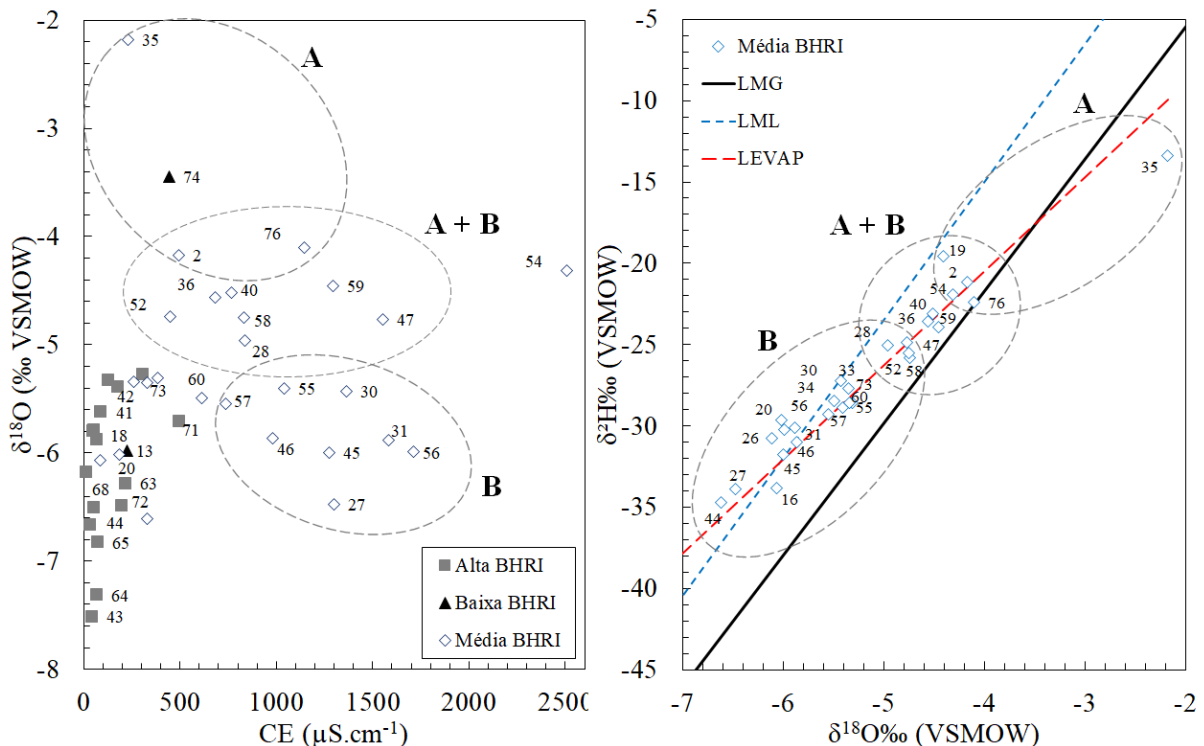


Figura 3.9: Correlação de valores de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e condutividade elétrica da água subterrânea. Fatores controladores (A: evaporação; A + B: evaporação e litologias; B: litologias).

Com a evaporação da água durante a infiltração no solo, espera-se que ocorra enriquecimento em isótopos pesados e aumento da condutividade elétrica, pois os isótopos pesados possuem preferência pela fase líquida e a evaporação reconcentra os íons dissolvidos (Larsson, 1985). Isso é o que acontece com a água dos poços da Alta BHRI e da Média e Baixa BHRI presentes no agrupamento A (Figura 3.9), tendo em vista que o aumento da condutividade elétrica ocorre gradativamente enquanto há enriquecimento em isótopos pesados.

Algumas amostras relativamente empobrecidas em  $^{18}\text{O}$  possuem condutividade elétrica bastante elevada, podendo chegar a  $1.800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , que é o caso do agrupamento B (Figura 3.9). Estas águas estão na Média BHRI e, apesar de bastante mineralizadas, caem muito próximo à



LML, indicando que possivelmente a infiltração é rápida nesses locais, e que a condutividade elétrica elevada está condicionada, nesses casos, pelos tipos de rochas pelas quais percolam.

Os poços do agrupamento B estão situados em um bairro de Cachoeiro de Itapemirim, principal centro urbano da bacia, onde a condutividade elétrica da água subterrânea é alta, variando entre 738,3 e 1.712,3  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Tabela 3.1). É possível que a elevada condutividade elétrica dessas águas, empobrecidas em  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$ , seja decorrente da presença de rochas carbonáticas no substrato da Média BHRI e não por fontes de contaminação como se poderia aventar. Oliveira et al., (2020) relatam que, nessa porção da bacia, diversos poços possuem águas com índice geoquímico  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{Ca}^{+2})$  menor que 0,2, o que segundo Hounslow, (1995) indica dissolução de carbonatos. Os mapas geológicos da região (Vieira, 1997; Vieira et al., 2014) mostram a ocorrência de lentes de rochas carbonáticas na média bacia, embora a escala regional não permita a individualização dos corpos em todas as áreas de ocorrência.

O agrupamento A+B possivelmente marca a transição da influência dos dois principais fatores que condicionam o desvio isotópico e a condutividade elétrica das águas subterrâneas. As águas deste grupo caem abaixo da LML, são mais enriquecidas em isótopos pesados e estão situadas na região com maior diversidade litológica da bacia.

#### **3.3.4. Conteúdo de Trítio ( $^3\text{H}$ )**

Segundo o modelo exponencial de renovação do Trítio concebido para a BHRI (Figura 3.10), o tempo de renovação da água subterrânea na porção da Alta BHRI é de, no máximo, 25,75 anos e, na Média BHRI, as idades variam desde 2,50 até 85,00 anos. As concentrações são baixas, entre 0,43 e 1,27 TU (Tabela 6.2 do material suplementar), em função da menor disponibilidade de  $^3\text{H}$  na atmosfera do Hemisfério Sul (Clark e Fritz, 1997).

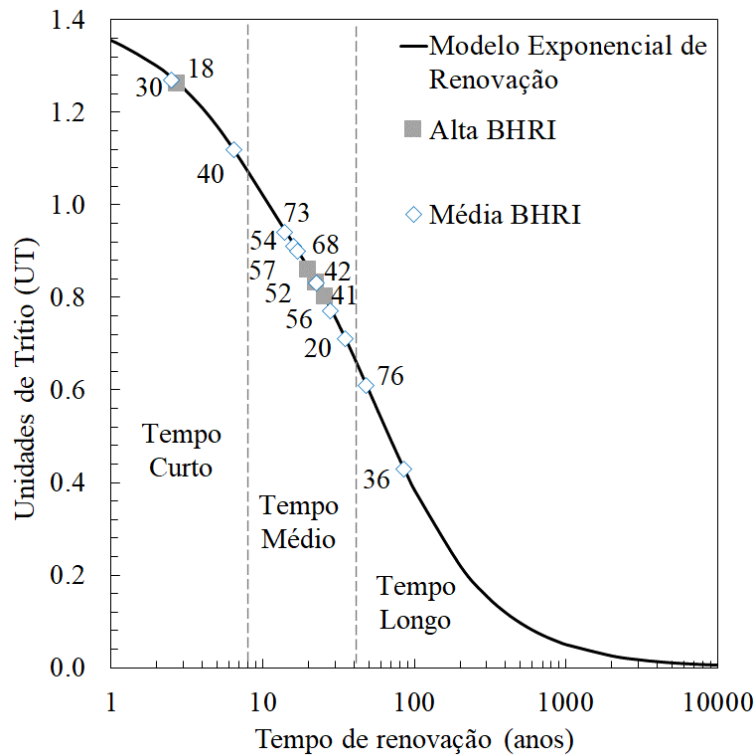


Figura 3.10: Modelo exponencial de renovação da água subterrânea na BHRI. Nesse trabalho, adota-se os termos Tempo Curto para tempo de renovação menor do que 6,50 anos; Tempo Médio entre 6,50 e 35,00 anos e Tempo Longo entre 35,00 e 85,00 anos (os números dentro do gráfico indicam os poços onde foi realizada amostragem para datação por Trítio).

Relacionando os resultados do tempo de renovação e da condutividade elétrica com os desvios isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}\%$  e  $\delta^2\text{H}\%$  (Figura 3.11) das amostras datadas, observa-se que os agrupamentos em função do processo de evaporação apontam também para a influência de outros fatores nas características hidrogeológicas das águas, relacionadas ao tempo de renovação, circulação no aquífero e mineralização a partir do contato com diferentes litotipos.

O agrupamento I na Figura 3.11 engloba os poços com águas empobrecidas em isótopos pesados e acima da LML, com tempos de renovação curtos a médios e mineralização baixa. Por estarem acima da LML, estima-se que a infiltração nestes poços seja rápida e, conforme o tempo de renovação aumenta, a água se torna mais mineralizada. Dentro desse grupo, os poços 30 e 56, evidenciam um fator local para o aumento da mineralização, estando contidos no agrupamento B da Figura 3.9, que mostra a influência dos litotipos carbonáticos na água subterrânea. Os tempos de renovação curtos das águas subterrâneas com assinatura isotópica próxima à da água da chuva indicam a presença de fluxos locais relacionados à recarga, enquanto águas com tempos de renovação médios indicam maior tempo de circulação no aquífero, em linhas de fluxos mais longas.

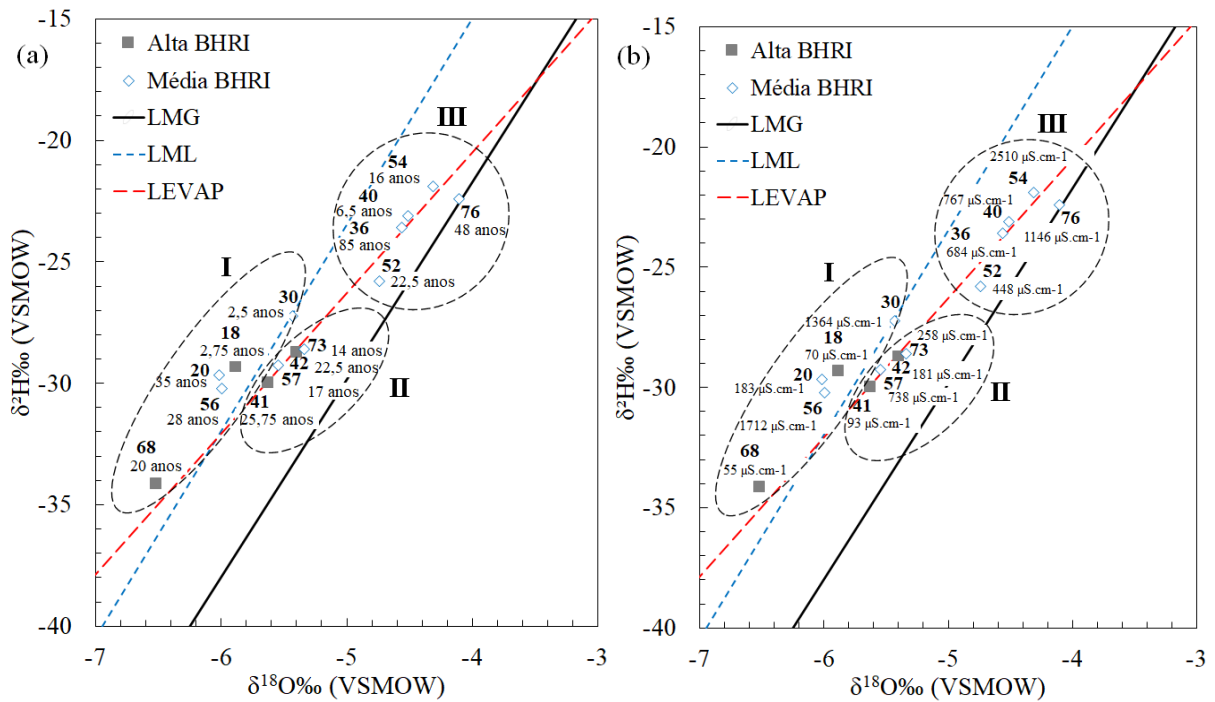


Figura 3.11: Relação entre a assinatura isotópica e (A) o tempo de renovação e; (B) o grau de mineralização indicado pela condutividade elétrica das águas subterrâneas da BHRI.

O agrupamento II na Figura 3.11 possui poços com água ligeiramente mais enriquecidas em isótopos pesados por estarem abaixo da LML, com tempos de renovação médios e mineralização moderada. Nestes poços é claro o aumento da mineralização à medida que os desvios isotópicos vão se afastando da LML, o que indica influência da evaporação na mineralização da água. Além disso, também é possível notar que as águas são progressivamente mais mineralizadas da Alta para a Média BHRI. Neste caso, o tempo de renovação de todos os poços é médio, o que juntamente com a progressiva mineralização da água subterrânea entre os setores da BHRI, indica a presença de fluxos entre os setores da BHRI. O poço 57 está na região de Cachoeiro de Itapemirim onde são citadas ocorrências de rochas carbonáticas, o que pode influenciar o aumento de sua condutividade elétrica.

O agrupamento III na Figura 3.11 possui poços com águas enriquecidas em isótopos pesados por serem as mais distantes da LML, a mineralização é elevada e os tempos de renovação são curtos a longos. Todos estes poços estão na Média BHRI, onde o clima é mais quente, o que favorece a evaporação e o distanciamento da LML. Quanto maior o enriquecimento em isótopos pesados, maior a mineralização, mas o tempo de renovação varia independentemente. Isso indica a presença de fluxos locais de águas infiltradas sob efeito da evaporação, como é o caso

do poço 40 cuja idade é de 6,5 anos, e de fluxos regionais compondo linhas de fluxo mais profundas e longas, como é o caso do poço 36 cuja idade é de 85 anos.

### 3.3.5. Assinatura isotópica da água superficial

A assinatura isotópica de  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  e  $\delta^2\text{H}\text{‰}$  da água superficial mostra que os desvios (Tabela 6.3 do material suplementar) seguem uma linha de evaporação conforme Equação 3-7, onde a atuação dos processos evaporativos é mais evidente que em relação à água subterrânea, o que era esperado tendo em vista a maior exposição da água superficial à radiação solar (Figura 3.12).

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = 5,59\delta^{18}\text{O}\text{‰} + 1,75 \quad (3-7)$$

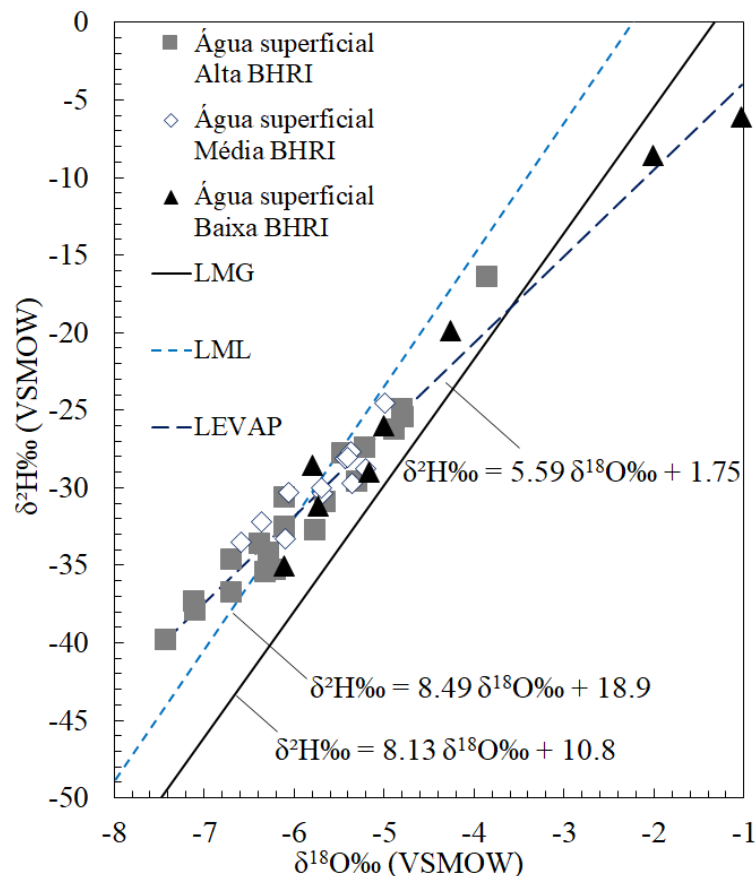


Figura 3.12: Assinatura isotópica da água superficial.

Apesar do enriquecimento em isótopos pesados observado na água superficial, existe uma tendência de semelhança com a assinatura da água subterrânea, o que mostra boa comunicação

hidráulica entre esses mananciais e indica a presença de canais efluentes, ou seja, rios que recebem água do aquífero (Figura 3.13A, B, C).

Parte das medidas caem muito próximo à LML, devido ao escoamento superficial das águas meteóricas durante o período chuvoso. Algumas medidas ficaram abaixo da LML, o que possivelmente está relacionado à evaporação da água durante o período seco, o que torna a água mais enriquecida isotopicamente.

Na baixa bacia, duas amostras do ponto X, situado próximo à foz do Rio Itapemirim, são fortemente enriquecidas em isótopos pesados em função da coleta ter sido realizada em situação de maré cheia, o que contribuiu com o aumento de  $^{18}\text{O}$  e  $^2\text{H}$  na água do rio (Figura 3.13C).

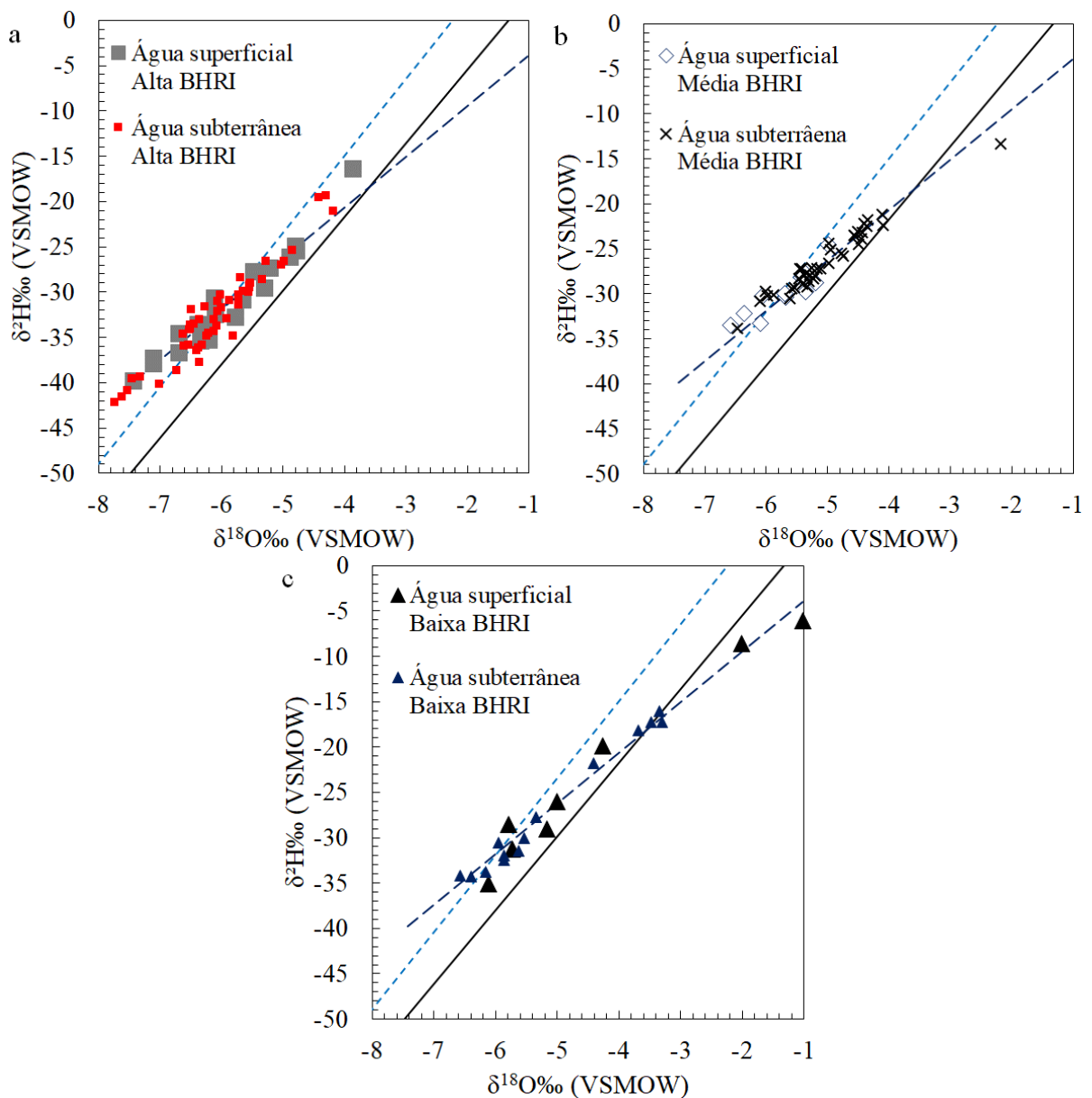


Figura 3.13: Assinatura isotópica da água superficial nos córregos da: (A) Alta BHRI; (B) Média BHRI e; (C) Baixa BHRI.

### 3.4. DISCUSSÃO

No sul do estado do Espírito Santo, a assinatura isotópica da água da chuva é definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49 \delta^{18}\text{O} + 18,97$ , mostrando forte fracionamento das massas de vapor em condição de não equilíbrio, semelhante ao que foi observado em estudos com águas meteóricas em escala regional no Brasil (e.g. Matsuyama et al., 2005) e na região do Mediterrâneo, onde o excesso de Deutério na precipitação pode chegar a 22‰ (e.g. Clark e Fritz, 1997; Zagana et al., 2007; Giustini et al., 2016). Os dados mostram aumento do fracionamento isotópico nas estações chuvosas, nos pontos de coleta mais próximos dos divisores de águas da bacia, e diminuição de -0.3‰  $\delta^{18}\text{O}$  e de -2.4‰  $\delta^2\text{H}$  a cada 100 metros de elevação. Esse comportamento reflete na diferenciação das linhas meteóricas da Média e Alta BHRI, e consiste nos bem conhecidos efeitos de quantidade de precipitação, continentalidade e altitude, identificados em diversos estudos isotópicos utilizando águas meteóricas (e.g. Dansgaard, 1964; Ingraham e Taylor, 1991; Breitenbach et al., 2010; Jhat e Jeelani, 2015).

A assinatura isotópica da água subterrânea é semelhante à da água da chuva e baixas idades determinadas pelo  $^3\text{H}$ , são comprovações da infiltração rápida, com variações conforme as condições climáticas, especialmente nas áreas mais quentes onde algumas amostras acompanham a linha de evaporação definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 5,78 \delta^{18}\text{O} + 2,67$ , o que também foi identificado em estudos do sistema de recarga em regiões semiáridas (e.g. Nkotagu, 1996). A evaporação durante a infiltração indicada pelo afastamento da LML, litotipos carbonáticos e aumento do tempo de renovação contribuem com o acréscimo da mineralização da água subterrânea. É preciso destacar que, uma vez no aquífero, a assinatura isotópica é mantida devido à inexistência de processos que propiciem o fracionamento isotópico (Clark e Fritz, 1997), sendo a variação do tempo de renovação relacionada à boa ou má circulação na zona saturada.

A assinatura isotópica da água superficial apresenta enriquecimento em isótopos pesados decorrente da exposição solar, especialmente no período seco, e proximidade com a LML nas medidas do período chuvoso. A semelhança, apesar do enriquecimento em isótopos pesados, com a água subterrânea indica que as drenagens são efluentes, funcionando como mecanismo de descarga do Sistema Aquífero Cristalino, ou seja, rios que recebem água do aquífero e seguem até a sua foz no Oceano Atlântico.

O sistema de fluxo e sistema de recarga aqui discutidos estão sumarizados e ilustrados no modelo hidrogeológico conceitual proposto para a área estudada (Figura 3.14).

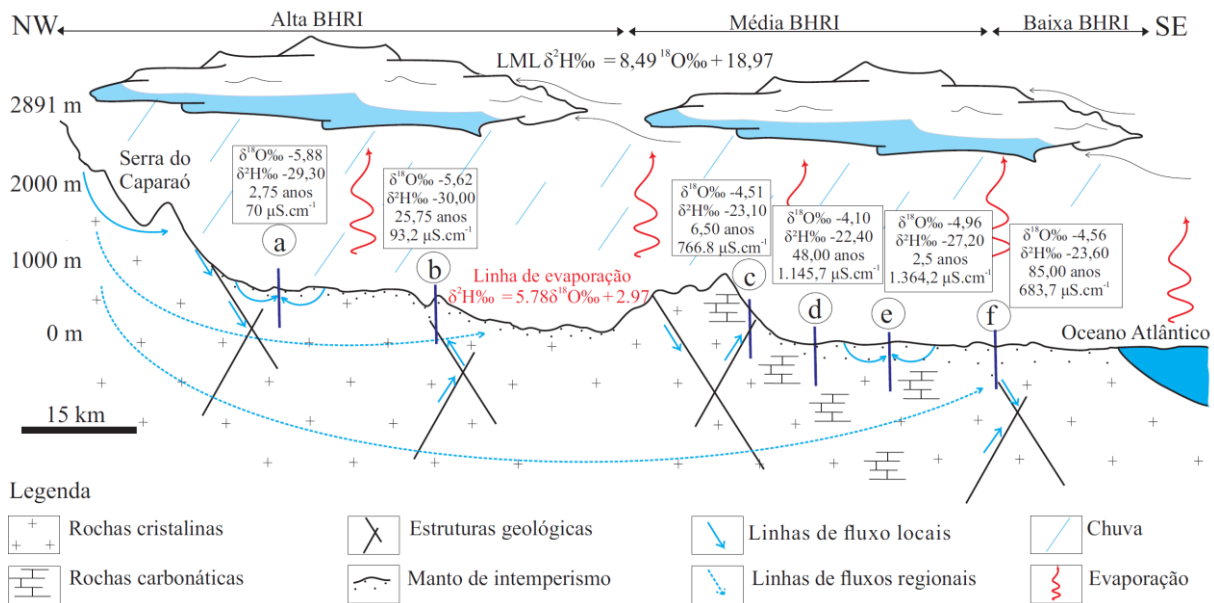


Figura 3.14: Modelo hidrogeológico conceitual de circulação da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim (BHRI), no sul do Estado do Espírito Santo, Região Sudeste do Brasil (as letras minúsculas dentro dos círculos indicam a posição hipotética de poços representativos daqueles cuja água foi descrita ao longo do texto).

A porção da Alta BHRI é uma importante zona de recarga da água subterrânea, onde o tempo de renovação é curto e há baixa mineralização. Os poços neste trecho são alimentados por linhas de fluxo locais, muitas vezes relacionadas ao armazenamento e circulação no manto de intemperismo (Poço a na Figura 3.14), ou por linhas de fluxo sub-regionais, que trazem as águas próximas dos divisores da bacia (Poço b na Figura 3.14). Estudos como o de Abbott et al., (2000) e Wang et al., (2020) mostram um grande potencial de zonas de recarga nas maiores elevações e sua transmissão em subsuperfície para diferentes segmentos de uma bacia hidrográfica.

Na Média BHRI, o efeito da evaporação é relevante e favorece o enriquecimento em isótopos pesados. O controle das estruturas geológicas na circulação subterrânea é observado nas variações locais do tempo de renovação, o que, juntamente com a influência litológica, pode provocar maior ou menor mineralização da água subterrânea. Nos locais onde as águas possuem curto tempo de renovação, como no poço c na Figura 3.14, existe a recarga local sob ação de efeitos evaporativos, porém quando o tempo de renovação aumenta (até 48 anos), eleva-se também a condutividade elétrica da água (Poço d na Figura 3.14). Alguns poços na Média BHRI também apresentam assinatura isotópica próxima à da água da chuva, tempos de renovação

muito curtos (até 2,5 anos) e elevada condutividade elétrica, possivelmente relacionada à recarga rápida em terrenos carbonáticos (Poço e na Figura 3.14).

Os poços com condutividade elétrica moderada, próximos a estruturas regionais e com longo tempo de renovação (até 85 anos) nas regiões mais baixas da bacia indicam que este sistema de fraturas pode transmitir água por grandes distâncias (Poço f na Figura 3.14). Essas águas percolam em fraturas desde a alta bacia até regiões mais baixas, comportamento já identificado em outros sistemas aquíferos cristalinos (e.g. Praamsma et al., 2009; Roques et al., 2014; Lyu et al., 2019; Bochet et al., 2020). Isso possivelmente indica mistura das águas subterrâneas provenientes dos setores alto e médio da bacia, confirmando os estudos hidroquímicos conduzidos na BHRI por Oliveira et al., (2020).

Locais com tempo de renovação curto indicam áreas com maior circulação da água subterrânea, onde a possibilidade de obtenção de poços produtivos é maior. Para confirmação dessa hipótese, estudos futuros com base em ensaios de aquífero para obtenção da condutividade hidráulica e transmissividade devem ser desenvolvidos, visando ao refinamento do modelo hidrogeológico conceitual de circulação. Além disso, devido ao número restrito de análises de Trítio e sua concentração baixa no Hemisfério Sul, recomenda-se a continuidade do monitoramento e aumento da malha amostral de poços tubulares profundos.

### 3.5. CONCLUSÕES

A assinatura isotópica da água da chuva na BHRI é definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49 \delta^{18}\text{O} + 18,97$ , mostrando forte fracionamento das massas de vapor em condição de não equilíbrio, por meio dos efeitos de quantidade de precipitação, altitude e continentalidade. Essa característica é semelhante à de regiões continentais ou de latitudes mais elevadas, o que não era esperado para uma bacia hidrográfica próxima ao litoral de uma região com clima tropical. Para validação da LML recomenda-se a continuidade do monitoramento, tendo em vista que as amostragens das águas meteóricas ocorreram em um período anômalo de baixa precipitação na BHRI.

O relevo influencia diretamente na assinatura isotópica da água meteórica e subterrânea, pois mostra controle nas massas de ar, no clima e nos processos evaporativos nos diversos setores da BHRI.



A Alta BHRI é uma importante região de recarga da água subterrânea, onde a assinatura isotópica é muito próxima à da chuva e possui mineralização baixa influenciada pelo tempo de renovação, que é de até 25,75 anos. Os poços neste trecho são alimentados por linhas de fluxo locais, muitas vezes relacionadas ao armazenamento e circulação no manto de intemperismo, ou por linhas de fluxo sub-regionais, que trazem as águas próximas dos divisores da bacia.

Na Média BHRI, o efeito da evaporação é evidente e favorece o enriquecimento em isótopos pesados, a mineralização é geralmente elevada e as águas possuem tempos de renovação curtos a longos, entre 2,50 a 85,00 anos. Nestes poços, a presença de litotipos carbonáticos e o maior afastamento da LML, agem diretamente no aumento da mineralização. Os locais onde as águas possuem curto tempo de renovação indicam fluxos locais de águas infiltradas sob ação de efeitos evaporativos, enquanto o tempo de renovação maior indica circulação por linhas de fluxos mais longas e profundas. As águas em alguns poços na Média BHRI também apresentam assinatura isotópica próxima à da chuva, tempos de renovação muito curtos e elevada condutividade elétrica, indicando que apesar de haver recarga regional a partir da Alta BHRI, a recarga local também ocorre, estando a mineralização relacionada aos litotipos carbonáticos, além da evaporação. Essas águas são descarregadas nos leitos dos rios, que se configuram como canais efluentes com água enriquecida isotopicamente por efeito de evaporação por exposição à radiação solar.

#### 4. CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração e análise dos dados obtidos nas duas etapas deste trabalho permitiram tecer algumas conclusões:

A assinatura isotópica da água da chuva na BHRI é definida pela equação  $\delta^2\text{H} = 8,49 \delta^{18}\text{O} + 18,97$ , mostrando forte fracionamento das massas de ar em condição de não equilíbrio físico-químico em relação à LMG, por meio dos efeitos de quantidade de precipitação, altitude e continentalidade. Essa característica é semelhante à de regiões continentais ou de latitudes mais elevadas, o que não era esperado para uma bacia hidrográfica próxima ao litoral de uma região com clima tropical. Para validação da LML recomenda-se a continuidade do monitoramento, tendo em vista que as amostragens das águas meteóricas ocorreram em um período anômalo de baixa precipitação na BHRI.

A Alta BHRI é uma importante região de recarga da água subterrânea, onde ocorrem águas bicarbonatadas mistas, a assinatura isotópica é muito próxima à da chuva e possui mineralização baixa influenciada pelas rochas silicáticas e pelo tempo de renovação curto a médio, que é de até 25,75 anos. Os poços neste trecho são alimentados por linhas de fluxo locais, muitas vezes relacionadas ao armazenamento e circulação no manto de intemperismo, ou por linhas de fluxo sub-regionais, que trazem as águas próximas dos divisores da bacia.

Na Média BHRI, o efeito da evaporação é evidente e favorece o enriquecimento em isótopos pesados, sua mineralização geralmente é elevada, os tipos hidroquímicos são variados sendo bicarbonatadas mistas, sódicas mistas, bicarbonatadas sódicas e mistas cloretadas, e as águas possuem tempos de renovação curtos a longos, entre 2,50 a 85,00 anos. Nestes poços, a presença de litotipos carbonáticos e calcissilicáticos e o maior afastamento da LML, agem diretamente no aumento da mineralização. Os locais onde as águas possuem curto tempo de renovação indicam fluxos locais de águas infiltradas sob ação de efeitos evaporativos, enquanto quando o tempo de renovação aumenta, há o indicativo de circulação por linhas de fluxos mais longas. A água em alguns poços na Média BHRI também apresentam assinatura isotópica próxima à da chuva, tempos de renovação muito curtos e elevada condutividade elétrica, indicando que apesar de haver recarga regional a partir da Alta BHRI, a recarga local também ocorre, estando a mineralização relacionada aos litotipos carbonáticos.

O relevo influencia diretamente na assinatura isotópica da água meteórica e subterrânea, pois mostra controle nas massas de ar, clima e evaporação nos setores a BHRI. Além disso, também controla o fluxo subterrâneo por gradiente hidráulico, no sentido das áreas altas (mais acidentadas) para as áreas baixas (menos acidentadas), o que favorece o aumento da mineralização observado. Além do menor gradiente hidráulico, as áreas baixas têm manto de intemperismo mais espesso (nas condições climáticas da região estudada), contribuindo para o maior tempo de residência e, por consequência, maior mineralização da água subterrânea. As condições climáticas, com temperaturas mais altas e menor umidade do ar na área central da bacia, topograficamente mais rebaixada, também podem contribuir com o enriquecimento mineral em decorrência da evaporação da água que infiltra no solo.

Essas áreas menos declivosas acomodam as maiores aglomerações urbanas, aumentando as possibilidades de efeitos antrópicos que podem interferir na qualidade das águas. A associação desses fatores torna, localmente, a água subterrânea imprópria para vários tipos de uso na porção da Média BHRI e chamam a atenção para a importância da continuidade do monitoramento de sua qualidade.

Essas águas são descarregadas nos leitos dos rios, que se configuram como canais efluentes cuja água é enriquecida isotopicamente por efeito de evaporação por exposição à radiação solar.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott, M.D., Lini, A., Bierman, P.R. 2000.  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and  $^3\text{H}$  measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. *Journal of Hydrology*. 228(1-2), 101–112. doi 10.1016/s0022-1694(00)00149-9.

ANA. 2020. Portal Hidroweb v3.1.1, Agência Nacional de Águas. Disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em 30 de março de 2020.

Appelo, C.A.J., Postma, D. 2006. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd edn. Balkema Publishers.

Bochet, O., Bethencourt, L., Dufresne, A., Farasin, J., Pédrot, M., Labasque, T., Chatton, E., Lavenant, N., Petton, C., Abbot, B.W., Aquilina, L., Le Borgne, T. 2020. Iron-oxidizer hotspots formed by intermitente oxic–anoxic fluid mixing in fractured rocks. *Nature Geoscience*. 13, 149–155. doi 10.1038/s41561-019-0509-1.

Banks, E.W., Simmons, C.T., Love, A.J., Cranswick, R., Werner, A.D., Bestland, E.A., Wood, M., Wilson, T. 2009. Fractured bedrock and saprolite hydrogeologic controls on groundwater/surface-water interaction: a conceptual model (Australia). *Hydrogeology Journal*. 17, 1969-1989. doi: 10.1007/s10040-009-0490-7.

Bochet, O., Bethencourt, L., Dufresne, A., Farasin, J., Pédrot, M., Labasque, T., Chatton, E., Lavenant, N., Petton, C., Abbot, B. W., Aquilina, L., Le Borgne, T. 2020. Iron-oxidizer hotspots formed by intermitente oxic–anoxic fluid mixing in fractured rocks. *Nature Geoscience*. 13, 149–155. doi: 10.1038/s41561-019-0509-1.

Boutt, D. F., Diggins, P., Mabee, S. 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. *Hydrogeology Journal*. 18(8), 1839–1854.

BRASIL. 2010 A. Agência Nacional de Águas - ANA. Bacias do Atlântico Sudeste. Disponível em <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/baciasAtlantico-Sudeste.aspx>. Acesso em 20 de março 2018.

BRASIL. 2010 B. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Censo demográfico de 2010. Disponível em <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=32&dados=0>>. Acesso em 02 junho 2018.

BRASIL. 2017. Ministério da Saúde. Portaria nº 05, de 28 de setembro de 2017. Disponível em [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005\\_03\\_10\\_2017.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html). Acesso em 29 abril 2019.

Breitenbach, S.F.M., Adkins, J.F., Meyer, H., Marwan, N., Kumar, K.K., Haug, G.H. 2010. Strong influence of water vapor source dynamics on stable isotopes in precipitation observed in Southern Meghalaya, NE India. *Earth and Planetary Science Letters*. 292(1-2), 212–220. doi 10.1016/j.epsl.2010.01.038.

Clark, I.D., Fritz, P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press.

Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 16(4), 436–468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x

ESPÍRITO SANTO. 2016. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural - INCAPER. *Anomalia de Precipitação - 2016*. Disponível em <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-chuva-anomalia-mensal-e-anual-2016>. Acesso em 30 janeiro 2020.

ESPÍRITO SANTO. 2018. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural - INCAPER. *Precipitação Observada - 2018*. Disponível em <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-chuva-acumulado-mensal-e-anual-2018>. Acesso em 12 fevereiro 2020.

Ezaki, S., Oda, G.H., Iritani, M.A., Veiga, C., Stradioto, M.R. 2014. Hidroquímica dos aquíferos Tubarão e Cristalino na região de Indaiatuba-Rafard, Estado de São Paulo. *Pesquisas em Geociências*. 41(1), 65-79. doi 10.22456/1807-9806.78036.

Foster, S. 2012. Hard-rock aquifers in tropical regions: using science to inform development and management policy. *Hydrogeology Journal*. 20, 659–672. doi 10.1007/s10040-011-0828-9.

GEOBASES. 2002. Bases Cartográficas do Espírito Santo. Disponível em <http://www.geobases.es.gov.br/portal/>. Acesso em 10 de maio 2018.

Giustini, F., Brilli, M., Patera, A. 2016. Mapping oxygen stable isotopes of precipitation in Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 8, 162–181. doi 10.1016/j.ejrh.2016.04.001.

Gomes, M.C.R., Cavalgante, I.N. 2015. Análise Geoquímica das águas subterrâneas de Fortaleza, Ceará – Brasil. *Águas Subterrâneas*. 29(1), 42-59. doi 10.14295/ras.v29i1.27917.

- Gradim, C., Roncato, J., Pedrosa-Soares, A.C., Cordani, U., Dussin, I., Alkmim, F.F., Queiroga, G., Jacobsohn, T., Silva, L.C., Babinski, M. 2014. The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. *Brazilian Journal of Geology*. 44(1), 155-180. doi 10.5327/Z2317-4889201400010012.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos-Neto, M.C., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi, V.A. 2004. *Província Mantiqueira, Geologia do Continente Sul-Americano*. 13, 203-234. Beca.
- Hem, J.D. 1985. *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water*. 3<sup>th</sup> ed. USGS – United States Geological Survey.
- Henriksen, H. 1995. Relation between topography and well yield in boreholes in crystalline rocks, Sogn og Fjordane, Norway. *Ground Water*. 33(4), 635-643. doi 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00319.x.
- Hounslow, A.W. 1995. *Water Quality Data*. Lewis Publishers, Boca Raton. New York.
- IAEA. 2020. Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP Database, International Atomic Energy Agency/World Meteorological Organization. Disponível em <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>. Acesso em 25 de maio 2020.
- Ingraham, N.L., Taylor, B.E. 1991. Light Stable Isotope Systematic of Large-Scale Hydrologic Regimes in California and Nevada. *Water Resources Research*. 27(1), 77-90. doi 10.1029/90WR01708.
- Iritani, M.A., Yoshinaga-Pereira, S., Ezaki, S., Oda, G.H.; Ferreira, L.M.R. 2011. Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no Município de Itu (SP). *Revista do Instituto Geológico*. 32 (1-2), 11-26. doi 10.5935/0100-929X.20110002.
- Jhat, N.A., Jeelani, G. 2015. Delineation of the recharge areas and distinguishing the sources of karst springs in Bringi watershed, Kashmir Kimalayas using hydrochemistry and environmental isotopes, *Indian Academy of Sciences. J. Earth Syst. Sci.* 124(8), 1667–1676. doi 10.1007/s12040-015-0629-y.
- Jurgens, B.C., Böhlke, J.K., Eberts, S.M. 2012. *TracerLPM Version 1: An Excel® Workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data*, US Geological Survey Techniques and Methods. Disponível em [https://ca.water.usgs.gov/user\\_projects/TracerLPM/](https://ca.water.usgs.gov/user_projects/TracerLPM/). Acesso em 25 de maio 2020.

- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B. 2011. The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*. 23(3), 145–161. doi 10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x.
- Larsson, I. 1985. *Águas Subterrâneas em Rocas Duras*. Projeto 8.6 del Programa Hidrológico Internacional. Disponível em [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000063230\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000063230_spa).
- Lyu, M., Pang, Z., Huang, T., Yin, L. 2019. Hydrogeochemical evolution and groundwater quality assessment in the Dake Lake Basin, Northwest China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. doi:10.1007/s10967-019-06515-8.
- Machiwal, D., Jha, M. 2015. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 4, 80–110. doi 10.1016/j.ejrh.2014.11.005.
- Matsuyama, H., Miyaoka, K., Masuda, K. 2005. Year-to-year variations of the stable isotopes in precipitation in february at Cuiabá, located on the northern fringe of Pantanal, Brazil. *Journal of Hydrometeorology*. 6(3), 324–329. doi 10.1175/jhm419.1.
- Menezes, J.M., Silva-Júnior, G.C., Santos, R.T. 2008. Hidrogeoquímica de Aquíferos Fraturados: Estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio São Domingos, Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. *Águas Subterrâneas*. 22(1), 75-90. doi 10.14295/ras.v22i1.8614.
- NASA, METI. 2011. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer ASTER Global Digital Elevation Model Version 2, US National Aeronautics and Space Administration and Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. Disponível em <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em 20 de abril 2018.
- Neal, C., Kirchner, J.W. 2000. Sodium and chloride levels in rainfall, mist, streamwater and groundwater at the Plynlimon catchments, mid-Wales: inferences on hydrological and chemical controls. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4(2), 295–310. doi 10.5194/hess-4-295-2000.
- Negrel, P., Pauwels, H., Dewandel, B., Gandolfi, J.M., Mascré, C., Ahmed, S. 2011. Understanding groundwater systems and their functioning through the study of stable water isotopes in a hard-rock aquifer (Maheshwaram watershed, India). *Journal of Hydrology*. 397, 55–70. doi 10.1016/j.jhydrol.2010.11.033.

- Nkotagu, H. 1996. Application of environmental isotopes to groundwater recharge studies in a semi-arid fractured crystalline basement area of Dodoma, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*. 22(4), 443–457. doi 10.1016/0899-5362(96)00022-x.
- Oliveira, M.S.M., Neves, M.A., Hirata, R.C.A., Bertolo, R.A., Caxito, F.A., Calegari, S.S. 2020, submetido. Hidrogeoquímica do sistema aquífero cristalino no sul do estado do Espírito Santo – Brasil, *Geologia USP*
- Peixoto-Oliveira, J., Neves, M.A., Calegari, S.S., Guadagnin, F. 2018. Compartimentação morfoestrutural da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo. *Geologia USP*. 18(2), 57-70. doi 10.11606/issn.2316-9095.v18-134749.
- Praamsma, T., Novakowski, K., Kyser, K., Hall, K. 2009. Using stable isotopes and hydraulic head data to investigate groundwater recharge and discharge in a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*. 366(1-4), 35–45. doi 10.1016/j.jhydrol.2008.12.011.
- Raju, N. J., Patel, P., Reddy, B.C.S.R., Suresh, U., Reddy, T.V.K. 2016. Identifying source and evaluation of hydrogeochemical processes in the hard rock aquifer system: geostatistical analysis and geochemical modeling techniques. *Environmental Earth Sciences*. 75, 1157. doi 10.1007/s12665-016-5979-5.
- Robins, N.S.; Smedley, P.L. 1994. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a small, hard-rock island - the heavily stressed aquifer of Jersey. *Journal of Hydrology*. 163, 249-269. doi [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90143-0).
- Roques, C., Aquilina, L., Bour, O., Maréchal, J.C., Dewandel, B., Pauwels, H., Labasque, T., Vergnaud-Ayraud, V., Hochreutener, R. 2014. Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. *Journal of Hydrology*. 519, 3110–3128. doi 10.1016/j.jhydrol.2014.10.052.
- Rose, S. 1992. Tritium in ground water of the Georgia piedmont: Implications for recharge and flow paths. *Hydrological Processes*. 6(1), 67–78. doi 10.1002/hyp.3360060107.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph Series*. 78, 1–36. doi 10.1029/gm078p0001.
- Salameh, E. 2004. Using environmental isotopes in the study of the recharge-discharge mechanisms of the Yarmouk catchment area in Jordan. *Hydrogeology Journal*. 12(4), 451-463. doi 10.1007/s10040-004-0357-x.



- Santiago, R., Caxito, F.A., Neves, M.A., Dantas, E.L., de Medeiros Júnior, E.B., Queiroga, G.N. 2020. Two generations of mafic dyke swarms in the Southeastern Brazilian coast: reactivation of structural lineaments during the gravitational collapse of the Araçuaí-Ribeira Orogen (500 Ma) and West Gondwana breakup (140 Ma). *Precambrian Research*. doi: 10.1016/j.precamres.2019.105344.
- Sardou-Filho, R., Matos, G.M.M., Mendes, V.A., Iza, E.R.H.F. 2013. Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- SEPLAN. 1999. Zonas Naturais do Espírito Santo, Secretaria de Estado do Planejamento SEPLAN. Disponível em <http://www.ijsn.es.gov.br/bibliotecaonline/Record/19691>. Acesso em 30 de março 2020.
- Silva, J.N. 1993. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Cachoeiro de Itapemirim. Folha SF.24-V-A-V. Estado do Espírito Santo. Escala 1:100.000. Brasília: DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral e CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- Singaraja, C., Chidambaram, S., Prasanna, M.V., Thivya, C., Thilagavathi, R. 2014. Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in hard rock coastal aquifers of Thoothukudi district in Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences*. 71, 451–464. doi: 10.1007/s12665-013-2453-5.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P. 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2<sup>th</sup> ed. Springer.
- Srinivasamoorthy, K., Chidambaram, S., Prasanna, M.V., Peter, J., Anandhan, P. 2008. Identification of major sources controlling groundwater chemistry from a hard rock terrain – a case study from Mettur taluk, Salem district, Tamil Nadu, India. *Journal of Earth System Science*. 117(1), 49 – 58. doi 10.1007/s12040-008-0012-3.
- Stoecker, F., Babel, M.S., Gupta, A.D., Rivas, A.A., Evers, M., Kazama, F., Nakam, T. 2013. Hydrogeochemical and isotopic characterization of groundwater salinization in the Bangkok aquifer system, Thailand. *Environmental Earth Science*. 68, 749–763. doi 10.1007/s12665-012-1776-y.
- Strahler, A.H. 1951. *Physical geography*. John Wiley & Sons.

- Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, L. 2010. Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 162, 123–137. doi: 10.1007/s10661-009-0781-4.
- Sukhija, B.S., Reddy, D.V., Nagabhushanam, P., Bhattacharya, S.K., Jani, R.A., Kumar, D. 2005. Characterisation of recharge processes and groundwater flow mechanisms in weathered-fractured granites of Hyderabad (India) using isotopes, *Hydrogeology Journal*. 14(5), 663-674. doi 10.1007/s10040-005-0461-6.
- Thivya, C., Chidambaram, S., Thilagavathi, R., Prasanna, M.V., Singaraja, C., Adithya, V.S., Nepolian, M. 2015. A multivariate statistical approach to identify the spatio-temporal variation of geochemical process in a hard rock aquifer. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187, 552. doi 10.1007/s10661-015-4738-5.
- Tweed, S.O., Weaver, T.R., Cartwright, I. 2005. Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, southeast Australia. *Hydrogeology Journal*. 13(5-6), 771-786. doi 10.1007/s10040-004-0348-y.
- Vieira, V.S. 1997. Mapa geológico da folha SF 24 Z-V-A em escala 1:250.000, CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Disponível em <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/8745?show=full>. Acesso em 15 de julho 2020.
- Vieira, V.S., Silva, M.A., Corrêa, T.R., Lopes, M.H.B. 2014. Mapa Geológico do Espírito Santo em escala 1:400.000, CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Disponível em <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em 15 de julho 2020.
- Wang, P., Zhang, F., Chen, Z. 2020. Characterization of recharge processes and groundwater flow paths using isotopes in the arid Santanghu basin, Northwest China. *Hydrogeology Journal*. doi 10.1007/s10040-020-02119-9.
- West, A.G., February, E.C., Bowen, G.J. 2014. Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes (“isoscapes”) in ground water and tap water across South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*. 145, 213-222. doi 10.1016/j.gexplo.2014.06.009.
- Zagana, E., Obeidat, M., Kuells, C., Udluft, P. 2007. Chloride, hydrochemical and isotope methods of groundwater recharge estimation in eastern Mediterranean areas: a case study in Jordan. *Hydrological Processes*. 21(16), 2112–2123. doi 10.1002/hyp.6390.

Zandonadi, L., Acquaotta, F., Fratianni, S., Zavattini, J.A. 2015. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). *Theoretical and Applied Climatology*. 123(3-4), 741-756. doi 10.1007/s00704-015-1391-4.

## 6. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela 6.1: Resultados do monitoramento de isótopos estáveis da água da chuva nas 20 estações de coleta da BHRI.

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta BHRI	Al-a	22/11/2013	N.M.	-1,67	-3,48
Alta BHRI	Al-a	15/12/2013	N.M.	-7,80	-55,71
Alta BHRI	Al-a	17/01/2014	N.M.	-9,70	-69,07
Alta BHRI	Al-a	22/02/2014	5000	-3,86	-16,77
Alta BHRI	Al-a	31/03/2014	2500	-2,45	-3,06
Alta BHRI	Al-a	25/04/2014	5250	-5,54	-24,49
Alta BHRI	Al-a	19/05/2014	1800	-2,97	-9,35
Alta BHRI	Al-a	23/06/2014	400	-1,94	2,13
Alta BHRI	Al-a	26/07/2014	150	-1,85	0,70
Alta BHRI	Al-a	28/08/2014	1300	-3,28	-8,09
Alta BHRI	Al-a	15/09/2014	N.M.	-1,29	6,73
Alta BHRI	Al-a	29/10/2014	1450	-2,12	-0,12
Alta BHRI	Al-a	25/11/2014	1850	-4,76	-22,84
Alta BHRI	Al-a	24/11/2015	3650	-3,24	-10,70
Alta BHRI	Al-a	22/12/2015	5350	-4,35	-19,60
Alta BHRI	Al-a	21/01/2016	5100	-4,99	-27,31
Alta BHRI	Al-a	22/02/2016	1850	-5,10	-27,82
Alta BHRI	Al-a	22/03/2016	3600	-4,67	-18,22
Alta BHRI	Al-a	30/04/2016	1300	-4,48	-15,14
Alta BHRI	Al-a	06/06/2016	800	-3,12	-6,97
Alta BHRI	Al-a	26/06/2016	1000	-3,97	-6,82
Alta BHRI	Al-a	02/08/2016	400	-1,29	9,32
Alta BHRI	Al-a	30/08/2016	250	-0,17	11,04
Alta BHRI	Al-a	05/10/2016	3500	-1,69	3,63
Alta BHRI	Al-a	25/11/2016	5000	-3,37	-11,54
Alta BHRI	Al-a	20/12/2016	5000	-7,93	-48,47
Alta BHRI	Al-b	24/11/2015	3150	-3,11	-10,37
Alta BHRI	Al-b	22/12/2015	4600	-4,43	-19,91
Alta BHRI	Al-b	21/01/2016	4300	-5,11	-27,92
Alta BHRI	Al-b	22/02/2016	1750	-5,20	-27,46
Alta BHRI	Al-b	22/03/2016	3600	-4,50	-17,25
Alta BHRI	Al-b	30/04/2016	1300	-4,56	-14,99
Alta BHRI	Al-b	06/06/2016	800	-3,13	-6,84
Alta BHRI	Al-b	26/06/2016	1000	-4,01	-6,76
Alta BHRI	Al-b	02/08/2016	400	-1,52	7,43
Alta BHRI	Al-b	30/08/2016	250	-0,53	9,93
Alta BHRI	Al-b	05/10/2016	3500	-1,69	3,97
Alta BHRI	Al-b	25/11/2016	5000	-3,68	-12,68
Alta BHRI	Al-b	20/12/2016	5000	-6,62	-44,57
Alta BHRI	An	21/11/2013	N.M.	-1,64	-1,58
Alta BHRI	An	18/12/2013	N.M.	-7,29	-47,22
Alta BHRI	An	23/02/2014	3150	-3,79	-19,13
Alta BHRI	An	29/03/2014	3300	-3,51	-6,21
Alta BHRI	An	25/04/2014	5250	-6,24	-26,70

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta BHRI	An	16/05/2014	600	-2,51	-1,17
Alta BHRI	An	23/06/2014	420	-2,50	0,61
Alta BHRI	An	02/08/2014	2400	-4,50	-14,83
Alta BHRI	An	27/08/2014	1900	-1,57	11,08
Alta BHRI	An	29/09/2014	475	-2,57	-3,55
Alta BHRI	An	01/11/2014	2100	-1,72	4,61
Alta BHRI	An	22/11/2014	500	-4,22	-19,79
Alta BHRI	An	11/02/2015	450	-7,02	-42,70
Alta BHRI	Cf	22/11/2013	N.M.	-1,92	-3,63
Alta BHRI	Cf	16/01/2014	N.M.	-12,97	-93,26
Alta BHRI	Cf	22/02/2014	3125	-4,06	-23,94
Alta BHRI	Cf	27/03/2014	4500	-3,23	-6,00
Alta BHRI	Cf	23/04/2014	3900	-5,68	-27,41
Alta BHRI	Cf	21/05/2014	N.M.	-4,94	-21,77
Alta BHRI	Cf	23/06/2014	1000	-3,60	-10,98
Alta BHRI	Cf	23/07/2014	400	-2,58	-6,14
Alta BHRI	Cf	26/08/2014	1350	-4,30	-15,56
Alta BHRI	Cf	17/09/2014	350	-2,17	1,20
Alta BHRI	Cf	21/10/2014	700	-1,67	5,66
Alta BHRI	Cf	22/11/2014	2800	-5,08	-22,49
Alta BHRI	Cf	11/02/2015	5200	-8,48	-52,86
Alta BHRI	Co	21/11/2013	N.M.	-4,56	-27,50
Alta BHRI	Co	15/12/2013	N.M.	-11,54	-82,07
Alta BHRI	Co	20/02/2014	2400	-5,70	-37,15
Alta BHRI	Co	26/03/2014	4500	-4,56	-13,82
Alta BHRI	Co	23/04/2014	5000	-5,41	-23,05
Alta BHRI	Co	18/05/2014	2400	-4,90	-25,52
Alta BHRI	Co	26/06/2014	450	-2,89	-1,77
Alta BHRI	Co	21/07/2014	550	-4,44	-5,96
Alta BHRI	Co	27/08/2014	4100	-3,03	-5,01
Alta BHRI	Co	29/09/2014	825	-2,63	-2,59
Alta BHRI	Co	01/11/2014	3300	-2,51	-0,76
Alta BHRI	Co	22/11/2014	4100	-5,23	-24,31
Alta BHRI	Co	13/02/2015	4950	-8,33	-53,76
Alta BHRI	Ft	22/11/2013	N.M.	-2,63	-11,16
Alta BHRI	Ft	18/12/2013	N.M.	-6,87	-43,74
Alta BHRI	Ft	18/01/2014	N.M.	-8,20	-57,59
Alta BHRI	Ft	20/02/2014	3400	-5,31	-28,81
Alta BHRI	Ft	26/03/2014	5250	-4,11	-9,08
Alta BHRI	Ft	22/04/2014	5450	-5,09	-19,92
Alta BHRI	Ft	17/05/2014	1600	-4,71	-18,94
Alta BHRI	Ft	26/06/2014	800	-3,42	-4,72
Alta BHRI	Ft	21/07/2014	1700	-4,69	-8,16
Alta BHRI	Ft	28/08/2014	3180	-3,34	-6,48
Alta BHRI	Ft	29/09/2014	1150	-2,77	-3,67
Alta BHRI	Ft	01/11/2014	4650	-3,20	-5,71
Alta BHRI	Ft	22/11/2014	2700	-4,85	-20,97
Alta BHRI	Ft	13/02/2015	5250	-7,38	-44,37
Alta BHRI	Fu	23/02/2016	2400	-3,48	-13,21
Alta BHRI	Fu	26/03/2016	3850	-5,56	-21,37
Alta BHRI	Fu	04/05/2016	2000	-5,99	-24,14

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta BHRI	Fu	22/05/2016	850	-5,04	-16,43
Alta BHRI	Fu	21/07/2016	2125	-4,75	-15,38
Alta BHRI	Fu	29/08/2016	350	-1,98	3,41
Alta BHRI	Fu	28/09/2016	3700	-1,88	3,09
Alta BHRI	Fu	27/10/2016	1900	-2,54	-2,37
Alta BHRI	Fu	23/11/2016	5000	-4,13	-14,72
Alta BHRI	Fu	19/12/2016	5000	-6,70	-37,80
Alta BHRI	Ib	21/11/2013	N.M.	-3,55	-16,83
Alta BHRI	Ib	21/12/2013	N.M.	-9,97	-69,62
Alta BHRI	Ib	17/01/2014	N.M.	-15,31	-114,32
Alta BHRI	Ib	19/02/2014	1300	-4,18	-23,11
Alta BHRI	Ib	27/03/2014	2000	-4,30	-14,71
Alta BHRI	Ib	22/04/2014	3300	-5,57	-24,55
Alta BHRI	Ib	21/05/2014	600	-7,34	-38,98
Alta BHRI	Ib	22/07/2014	400	-3,70	-4,58
Alta BHRI	Ib	24/08/2014	1950	-3,88	-13,51
Alta BHRI	Ib	22/10/2014	896	-2,03	3,32
Alta BHRI	Ib	12/02/2015	5150*	-8,41	-50,84
Alta BHRI	Ib	30/11/2015	1645	-2,31	-5,33
Alta BHRI	Ib	18/12/2015	3500	-5,42	-27,46
Alta BHRI	Ib	21/01/2016	5200	-8,67	-56,24
Alta BHRI	Ib	23/02/2016	5300	-6,87	-41,72
Alta BHRI	Ib	05/04/2016	2660	-5,33	-21,42
Alta BHRI	Ib	02/05/2016	620	-6,68	-30,41
Alta BHRI	Ib	01/06/2016	812	-5,29	-23,33
Alta BHRI	Ib	25/06/2016	625	-5,61	-18,54
Alta BHRI	Ib	21/07/2016	50	-2,05	1,50
Alta BHRI	Ib	28/09/2016	1850	-1,94	1,74
Alta BHRI	Ib	27/10/2016	3500	-1,81	0,42
Alta BHRI	Ib	23/11/2016	5000	-5,39	-26,16
Alta BHRI	Ib	19/12/2016	5000	-5,27	-27,00
Alta BHRI	Ir	21/11/2013	N.M.	-3,42	-16,40
Alta BHRI	Ir	21/12/2013	N.M.	-9,83	-65,61
Alta BHRI	Ir	17/01/2014	N.M.	-15,31	-114,51
Alta BHRI	Ir	19/02/2014	1400	-3,98	-17,87
Alta BHRI	Ir	27/03/2014	4250	-4,31	-13,32
Alta BHRI	Ir	22/04/2014	2350	-5,14	-20,83
Alta BHRI	Ir	18/05/2014	3500	-6,31	-31,19
Alta BHRI	Ir	25/06/2014	300	-3,37	-1,90
Alta BHRI	Ir	22/07/2014	1650	-3,46	-4,50
Alta BHRI	Ir	15/09/2014	N.M.	-1,71	8,37
Alta BHRI	Pi	21/11/2013	N.M.	-4,01	-21,18
Alta BHRI	Pi	31/12/2014	N.M.	-11,37	-80,35
Alta BHRI	Pi	19/02/2014	2300	-4,79	-25,15
Alta BHRI	Pi	27/03/2014	3650	-4,38	-14,58
Alta BHRI	Pi	22/04/2014	5000	-5,90	-25,93
Alta BHRI	Pi	18/05/2014	2000	-5,03	-23,95
Alta BHRI	Pi	25/06/2014	300	-2,74	-3,06
Alta BHRI	Pi	22/07/2014	700	-4,13	-8,81
Alta BHRI	Pi	26/08/2014	2000	-3,31	-5,38
Alta BHRI	Pi	17/09/2014	350	-2,35	-0,66

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta BHRI	Pi	25/10/2014	1400	-0,51	15,55
Alta BHRI	Pi	23/11/2014	4000	-5,37	-24,98
Alta BHRI	Pi	12/02/2015	5350	-8,29	-50,64
Alta BHRI	St	21/11/2013	N.M.	-3,34	-16,64
Alta BHRI	St	21/12/2013	N.M.	-9,43	-62,17
Alta BHRI	St	31/01/2014	N.M.	-14,18	-105,80
Alta BHRI	St	27/03/2014	4650	-5,31	-21,07
Alta BHRI	St	24/04/2014	5250	-5,15	-20,76
Alta BHRI	St	18/05/2014	3200	-4,75	-24,19
Alta BHRI	St	25/06/2014	650	-4,33	-5,45
Alta BHRI	St	22/07/2014	450	-2,82	-2,79
Alta BHRI	St	24/08/2014	4200	-2,75	1,51
Alta BHRI	St	17/09/2014	625	-3,66	-9,33
Alta BHRI	St	25/10/2014	2350	-0,87	12,68
Alta BHRI	St	12/02/2015	5200*	-7,38	-42,21
Alta BHRI	Tc	21/11/2013	N.M.	-3,09	-12,87
Alta BHRI	Tc	21/12/2013	N.M.	-7,70	-50,10
Alta BHRI	Tc	17/01/2014	N.M.	-14,11	-105,14
Alta BHRI	Tc	19/02/2014	3600	-4,59	-22,31
Alta BHRI	Tc	27/03/2014	4500	-4,62	-15,47
Alta BHRI	Tc	22/04/2014	5250	-5,65	-24,73
Alta BHRI	Tc	18/05/2014	2100	-4,98	-16,03
Alta BHRI	Tc	25/06/2014	1600	-3,72	-8,70
Alta BHRI	Tc	22/07/2014	1100	-4,15	-9,23
Alta BHRI	Tc	24/08/2014	2850	-3,21	-7,38
Alta BHRI	Tc	21/10/2014	1900	-1,71	6,37
Alta BHRI	Tc	23/11/2014	5100	-5,19	-21,60
Alta BHRI	Tc	12/02/2015	5150	-9,38	-57,82
Alta BHRI	Tc	25/11/2015	5300	-2,73	-5,04
Alta BHRI	Tc	16/12/2015	5350	-5,89	-29,19
Alta BHRI	Tc	21/01/2016	5400	-8,88	-57,12
Alta BHRI	Tc	23/02/2016	5200	-7,48	-43,54
Alta BHRI	Tc	20/03/2016	4850	-4,78	-19,04
Alta BHRI	Tc	02/05/2016	2350	-4,78	-18,58
Alta BHRI	Tc	22/05/2016	1300	-5,60	-20,60
Alta BHRI	Tc	25/06/2016	2350	-4,19	-10,77
Alta BHRI	Tc	21/07/2016	650	-3,29	-1,94
Alta BHRI	Tc	29/08/2016	1250	-2,37	4,25
Alta BHRI	Tc	28/09/2016	2650	-2,24	1,72
Alta BHRI	Tc	19/12/2016	5000	-6,97	-38,10
Alta BHRI	Ve	21/11/2013	N.M.	-3,36	-15,47
Alta BHRI	Ve	21/12/2013	N.M.	-11,27	-79,75
Alta BHRI	Ve	18/01/2014	N.M.	-16,45	-122,19
Alta BHRI	Ve	28/02/2014	N.M.	-5,50	-32,26
Alta BHRI	Ve	22/03/2014	1700	-3,39	-4,09
Alta BHRI	Ve	20/04/2014	4800	-5,30	-21,77
Alta BHRI	Ve	18/05/2014	1400	-2,99	-8,03
Alta BHRI	Ve	22/06/2014	200	-2,33	-5,19
Alta BHRI	Ve	27/07/2014	500	-3,71	-1,00
Alta BHRI	Ve	23/08/2014	4800	-4,43	-16,51
Alta BHRI	Ve	13/09/2014	200	-2,38	-0,60

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta BHRI	Ve	12/10/2014	250	-1,27	9,93
Alta BHRI	Ve	22/11/2014	4700	-4,66	-20,12
Alta BHRI	Ve	23/12/2014	1400	-7,29	-42,48
Alta BHRI	Ve	18/01/2015	1000	-7,46	-42,58
Alta BHRI	Ve	09/02/2015	5000	-6,96	-41,99
Alta BHRI	Ve	22/11/2015	2600	-3,70	-13,11
Alta BHRI	Ve	20/12/2015	4100	-5,37	-27,37
Alta BHRI	Ve	20/01/2016	5000	-8,50	-54,15
Alta BHRI	Ve	21/02/2016	5000	-8,97	-57,50
Alta BHRI	Ve	20/03/2016	3300	-5,30	-23,63
Alta BHRI	Ve	23/04/2016	500	-4,25	-22,51
Alta BHRI	Ve	22/05/2016	300	-4,71	-21,54
Alta BHRI	Ve	20/06/2016	1200	-3,74	-9,51
Alta BHRI	Ve	23/07/2016	400	-1,67	7,50
Alta BHRI	Ve	20/08/2016	60	-1,10	12,27
Alta BHRI	Ve	18/09/2016	3000	-3,04	-7,04
Alta BHRI	Ve	16/10/2016	2500	-3,26	-10,25
Alta BHRI	Ve	20/11/2016	3200	-2,82	-9,91
Alta BHRI	Ve	17/12/2016	4000	-2,88	-10,58
Média BHRI	Ca	22/11/2013	N.M.	-1,69	0,25
Média BHRI	Ca	31/12/2014	N.M.	-8,75	-60,85
Média BHRI	Ca	20/02/2014	2000	-4,39	-23,61
Média BHRI	Ca	26/03/2014	5200	-4,60	-14,43
Média BHRI	Ca	23/04/2014	3350	-4,89	-18,76
Média BHRI	Ca	18/05/2014	2400	-4,40	-21,40
Média BHRI	Ca	26/06/2014	250	-1,58	3,27
Média BHRI	Ca	21/07/2014	700	-3,71	-2,69
Média BHRI	Ca	27/08/2014	1750	-3,08	-4,78
Média BHRI	Ca	29/09/2014	1400	-2,07	-0,84
Média BHRI	Ca	01/11/2014	5200	-1,46	6,32
Média BHRI	Ca	22/11/2014	5200	-3,58	-14,00
Média BHRI	Ca	13/02/2015	5200	-6,83	-43,51
Média BHRI	Ct	23/02/2016	700	-3,36	-11,49
Média BHRI	Ct	21/03/2016	2700	-5,29	-21,45
Média BHRI	Ct	02/05/2016	30	-1,50	-6,59
Média BHRI	Ct	22/05/2016	270	-4,16	-13,06
Média BHRI	Ct	20/06/2016	900	-4,73	-15,02
Média BHRI	Ct	22/07/2016	350	-2,74	2,87
Média BHRI	Ct	29/08/2016	200	0,65	16,73
Média BHRI	Ct	28/09/2016	400	-0,39	12,56
Média BHRI	Ct	28/10/2016	1000	-2,31	-0,20
Média BHRI	Ct	23/12/2016	5000	-3,11	-9,66
Média BHRI	Ct	20/12/2016	5000	-6,46	-37,71
Média BHRI	Cx	22/11/2013	N.M.	-2,68	-10,02
Média BHRI	Cx	27/12/2013	N.M.	-10,15	-70,58
Média BHRI	Cx	20/01/2014	N.M.	-1,22	-2,20
Média BHRI	Cx	26/02/2014	1700	-3,25	-12,60
Média BHRI	Cx	24/03/2014	3600	-2,64	-5,22
Média BHRI	Cx	26/04/2014	4800	-5,76	-22,11
Média BHRI	Cx	17/05/2014	400	-1,94	-4,08
Média BHRI	Cx	28/06/2014	750	-1,49	6,13



Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Média BHRI	Cx	26/07/2014	350	-3,75	-8,07
Média BHRI	Cx	24/08/2014	2650	-2,67	-2,61
Média BHRI	Cx	26/09/2014	550	-1,45	1,64
Média BHRI	Cx	01/11/2014	2750	-0,85	8,70
Média BHRI	Cx	06/12/2014	2500	-5,98	-33,21
Média BHRI	Cx	19/02/2015	3000	-7,07	-47,68
Média BHRI	Cx	24/11/2015	3700	-4,08	-17,85
Média BHRI	Cx	20/12/2015	3200	-4,65	-22,28
Média BHRI	Cx	21/01/2016	3000	-4,02	-18,11
Média BHRI	Cx	25/02/2016	3000	-5,96	-37,29
Média BHRI	Cx	24/03/2016	2700	-5,23	-19,82
Média BHRI	Cx	30/04/2016	300	-4,60	-10,09
Média BHRI	Cx	25/05/2016	35	-4,40	-12,93
Média BHRI	Cx	28/07/2016	2800	-2,90	-4,82
Média BHRI	Cx	10/10/2016	2880	-1,35	5,50
Média BHRI	Cx	06/11/2016	1000	-1,40	2,85
Média BHRI	Cx	07/12/2016	5000	-2,72	-8,48
Média BHRI	Cx	12/02/2017	5000	-3,82	-16,72
Média BHRI	Je	22/11/2013	N.M.	-1,96	-6,22
Média BHRI	Je	15/12/2013	N.M.	-7,43	-48,31
Média BHRI	Je	16/01/2014	N.M.	-9,11	-62,62
Média BHRI	Je	20/02/2014	4250	-1,84	-3,62
Média BHRI	Je	26/03/2014	3600	-3,09	-3,88
Média BHRI	Je	22/04/2014	3650	-4,79	-19,34
Média BHRI	Je	25/06/2014	3400*	-4,32	-15,75
Média BHRI	Je	21/07/2014	250	-4,08	-5,68
Média BHRI	Je	22/08/2014	1550	-3,30	-7,85
Média BHRI	Je	29/09/2014	725	-1,51	2,40
Média BHRI	Je	01/11/2014	5350	-2,99	1,13
Média BHRI	Je	22/11/2014	2200	-4,75	-23,46
Média BHRI	Je	11/02/2015	5150	-6,35	-37,89
Média BHRI	Mu	22/11/2013	N.M.	-3,35	-17,51
Média BHRI	Mu	27/12/2013	N.M.	-9,33	-65,39
Média BHRI	Mu	20/01/2014	N.M.	-2,82	-14,02
Média BHRI	Mu	26/02/2014	700*	-5,33	-36,65
Média BHRI	Mu	31/03/2014	5200	-4,39	-12,80
Média BHRI	Mu	23/04/2014	800	-5,67	-24,68
Média BHRI	Mu	17/05/2014	1600	-5,41	-29,75
Média BHRI	Mu	26/06/2014	500	-1,46	6,89
Média BHRI	Mu	26/07/2014	800	-4,73	-11,25
Média BHRI	Mu	22/08/2014	1650	-2,83	-4,15
Média BHRI	Mu	17/09/2014	170	-1,68	2,80
Média BHRI	Mu	30/10/2014	4000	-2,95	4,23
Média BHRI	Mu	22/11/2014	750	-4,11	-16,62
Média BHRI	Mu	13/02/2015	4600	-7,00	-44,57
Média BHRI	Pc	22/11/2013	N.M.	-3,30	-15,32
Média BHRI	Pc	31/12/2014	N.M.	-9,19	-63,85
Média BHRI	Pc	20/02/2014	3600	-4,96	-30,79
Média BHRI	Pc	26/03/2014	1800	-5,02	-16,41
Média BHRI	Pc	22/04/2014	4000	-5,05	-19,63
Média BHRI	Pc	18/05/2014	1850	-4,34	-21,00

Setor da BHRI	Estação	Data coleta	Vol. (mL)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Média BHRI	Pc	26/06/2014	500	-1,54	2,80
Média BHRI	Pc	21/07/2014	1100	-4,68	-8,81
Média BHRI	Pc	22/08/2014	1550	-3,06	-5,75
Média BHRI	Pc	29/09/2014	20	1,09	10,65
Média BHRI	Pc	01/11/2014	3650	-2,37	6,03
Média BHRI	Pc	22/11/2014	1100	-4,88	-23,89
Média BHRI	Pc	11/02/2015	5600	-6,10	-39,12
Baixa BHRI	It	22/11/2013	N.M.	-1,82	-10,50
Baixa BHRI	It	15/12/2013	N.M.	-5,43	-31,35
Baixa BHRI	It	20/01/2014	N.M.	-11,15	-78,85
Baixa BHRI	It	20/02/2014	400	-4,09	-20,42
Baixa BHRI	It	26/03/2014	1700	-3,38	-5,90
Baixa BHRI	It	21/04/2014	3800	-4,61	-15,75
Baixa BHRI	It	17/05/2014	1150	-4,64	-24,98
Baixa BHRI	It	24/06/2014	2250	-2,01	2,39
Baixa BHRI	It	23/07/2014	350	-4,37	-12,54
Baixa BHRI	It	24/08/2014	1700	-2,88	-4,87
Baixa BHRI	It	30/09/2014	200	-0,11	14,15
Baixa BHRI	It	22/11/2014	1000	-1,72	1,21
Baixa BHRI	It	11/02/2015	1250	-7,42	-49,98
Baixa BHRI	It	24/11/2015	3250	-3,37	-10,61
Baixa BHRI	It	16/12/2015	3500	-5,13	-25,46
Baixa BHRI	It	20/01/2016	2400	-5,40	-27,45
Baixa BHRI	It	22/02/2016	1600	-7,06	-43,85
Baixa BHRI	It	24/03/2016	2300	-5,23	-20,78
Baixa BHRI	It	30/04/2016	300	-4,77	-9,93
Baixa BHRI	It	21/05/2016	230	-4,96	-18,04
Baixa BHRI	It	20/06/2016	870	-4,67	-11,93
Baixa BHRI	It	20/07/2016	1350	-2,57	2,85
Baixa BHRI	It	05/09/2016	2450	-2,21	5,79
Baixa BHRI	It	27/09/2016	1175	-1,43	6,56
Baixa BHRI	It	24/10/2016	2180	-2,08	2,35
Baixa BHRI	It	23/11/2016	4400	-2,80	-7,97
Baixa BHRI	It	20/12/2016	5000	-5,22	-27,13
Baixa BHRI	Sf	22/11/2013	N.M.	-2,39	-8,52
Baixa BHRI	Sf	15/12/2013	N.M.	-5,67	-35,03
Baixa BHRI	Sf	20/01/2014	N.M.	-8,54	-59,71
Baixa BHRI	Sf	20/02/2014	500	-2,04	-4,44
Baixa BHRI	Sf	26/03/2014	2000	-2,51	0,98
Baixa BHRI	Sf	22/04/2014	4150	-4,48	-15,65
Baixa BHRI	Sf	21/05/2014	1450	-5,19	-28,10
Baixa BHRI	Sf	26/06/2014	850	-1,57	6,64
Baixa BHRI	Sf	21/07/2014	400	-3,89	-10,15
Baixa BHRI	Sf	23/08/2014	2250	-2,78	-2,65
Baixa BHRI	Sf	20/09/2014	30	1,79	23,03
Baixa BHRI	Sf	20/10/2014	900	-1,22	3,61
Baixa BHRI	Sf	19/11/2014	1200	-1,57	4,40
Baixa BHRI	Sf	11/02/2015	1600	-8,39	-53,49

Tabela 6.2: Resultados da campanha de amostragem de agosto/2018 para análises de Trítio ( $^3\text{H}$ ).

Porção BHRI	Poço	Data coleta	Resultado $^3\text{H}$ (UT)	Erro ( $\pm$ )	Tempo de renovação (anos)
Alta	18	14/08/2018	1,26	0,25	2,75
Alta	41	17/08/2018	0,80	0,23	25,75
Alta	42	17/08/2018	0,83	0,23	22,50
Alta	68	14/08/2018	0,86	0,23	20,00
Média	20	16/08/2018	0,71	0,23	35,00
Média	30	13/08/2018	1,27	0,20	2,50
Média	36	16/08/2018	0,43	0,22	85,00
Média	40	14/08/2018	1,12	0,22	6,50
Média	52	16/08/2018	0,83	0,20	22,50
Média	54	16/08/2018	0,91	0,25	16,00
Média	56	13/08/2018	0,77	0,23	28,00
Média	57	13/08/2018	0,90	0,22	17,00
Média	73	18/08/2018	0,94	0,20	14,00
Média	76	14/08/2018	0,61	0,24	48,00

Tabela 6.3: Resultados do monitoramento de isótopos estáveis da água superficial nos 10 pontos de coleta no Rio Itapemirim e seus afluentes.

Setor da BHRI	Estação	Data da coleta	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^2\text{H}\text{‰}$
Alta	I	23/02/2016	-5,77	-32,73
Alta	I	22/05/2016	-6,70	-36,70
Alta	I	21/07/2016	-7,42	-39,79
Alta	I	19/12/2016	-4,80	-24,92
Alta	II	23/02/2016	-6,21	-35,26
Alta	II	22/05/2016	-6,28	-34,16
Alta	II	21/07/2016	-7,10	-37,92
Alta	II	19/12/2016	-5,22	-27,38
Alta	III	23/02/2016	-5,30	-29,54
Alta	III	22/05/2016	-5,66	-30,89
Alta	III	22/07/2016	-6,69	-34,62
Alta	III	20/12/2016	-3,86	-16,40
Alta	IV	23/02/2016	-6,33	-35,38
Alta	IV	22/05/2016	-6,38	-33,58
Alta	IV	21/07/2016	-7,11	-37,29
Alta	IV	19/12/2016	-6,10	-32,49
Alta	V	22/02/2016	-4,78	-25,42
Alta	V	21/05/2016	-5,47	-27,78
Alta	V	23/07/2016	-6,11	-30,63
Alta	V	20/12/2016	-4,89	-26,19
Média	VI	22/02/2016	-6,10	-33,33
Média	VI	21/05/2016	-5,69	-30,36
Média	VI	23/07/2016	-6,59	-33,51
Média	VI	20/12/2016	-5,69	-30,00
Média	VII	23/02/2016	-5,20	-28,80
Média	VII	22/05/2016	-5,40	-28,03
Média	VII	22/07/2016	-6,36	-32,21
Média	VII	19/12/2016	-4,99	-24,57
Média	VIII	22/02/2016	-5,36	-29,73
Média	VIII	21/05/2016	-5,43	-28,13
Média	VIII	26/07/2016	-6,06	-30,31
Média	VIII	20/12/2016	-5,37	-27,67
Baixa	IX	22/02/2016	-5,16	-29,02
Baixa	IX	21/05/2016	-5,00	-26,01
Baixa	IX	20/07/2016	-5,79	-28,53
Baixa	IX	20/12/2016	-5,73	-31,21
Baixa	X	22/02/2016	-1,02	-6,11
Baixa	X	21/05/2016	-2,01	-8,58
Baixa	X	20/07/2016	-4,26	-19,85
Baixa	X	20/12/2016	-6,11	-35,04

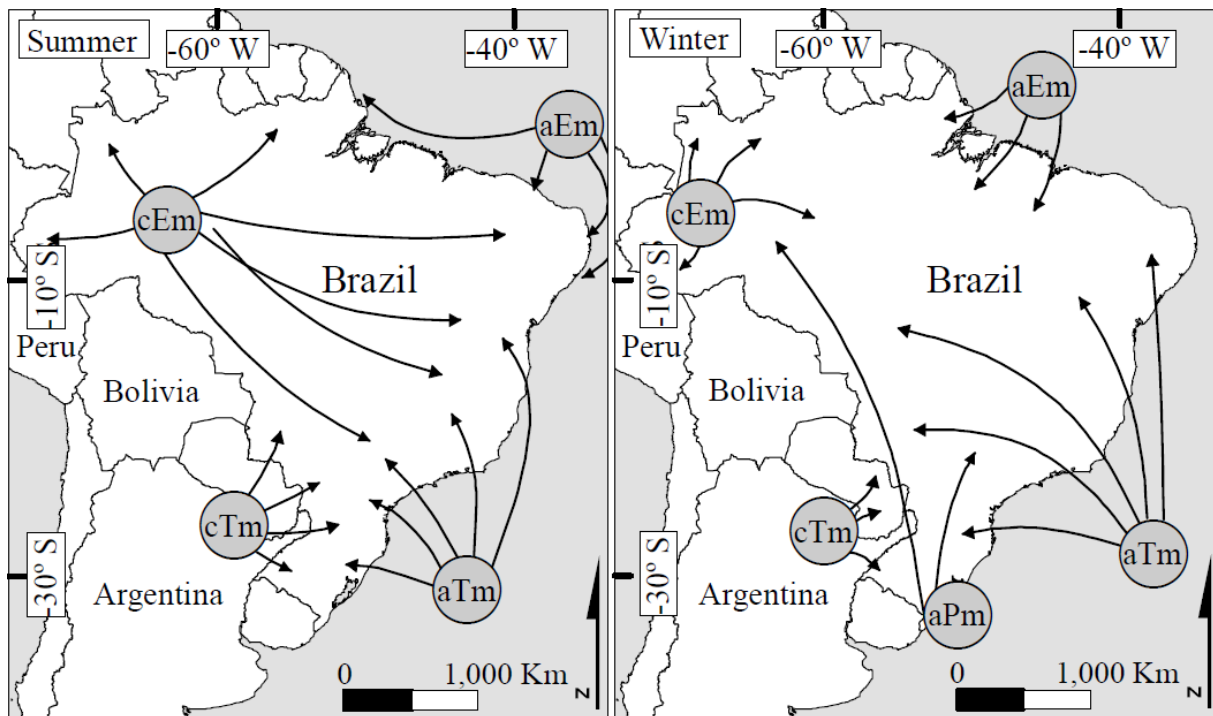


Figura 6.1: Dinâmica das massas de ar no Brasil. Massas de ar: cEm = Massa Equatorial Continental; cTm = Massa Continental Tropical; aTm = Massa Tropical Atlântica; aEm = Massa Equatorial do Atlântico; aPm = Massa Polar Atlântica.

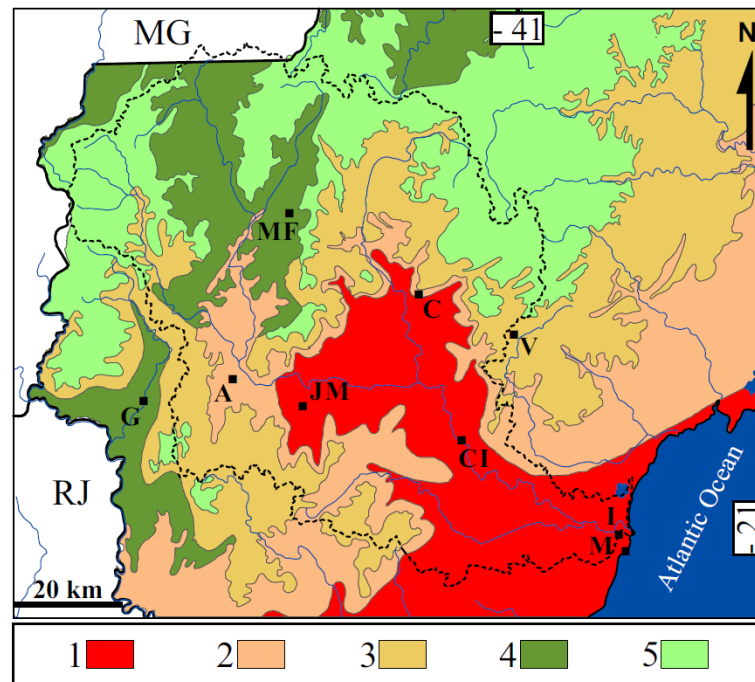


Figura 6.2: Mapa de zoneamento climático da região sul do Estado do Espírito Santo (adaptado de SEPLAN, 1999), onde: 1 = terras quentes e secas; 2 = terras chuvosas-secas quentes e transitórias; 3 = temperaturas amenas e terras chuvosas; 4 = temperaturas amenas e chuvoso-seco, e; 5 = terras frias e chuvosas.