

# Hidrogeoquímica das águas subterrâneas dos domínios Santa Maria da Vitória/Cocos, (NE Bahia, Brasil)

Júlio Vieira Carvalho<sup>1</sup> (*in memorian*)  
Sergio Augusto de Moraes Nascimento<sup>2</sup>  
Manuel Vitor Portugal Gonçalves<sup>3</sup>  
Manoel Jerônimo Moreira Cruz<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia.  
Instituto de Geociências  
Pós-graduação em Geologia  
Campus da Ondina  
Rua Barão de Geremoabo, s/n, sala 301-B,  
Federação  
Salvador BA Brasil  
CEP 40110-200

<sup>2</sup> Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Geociências  
Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada.  
Rua Barão de Geremoabo s/n  
Campus Ondina  
Salvador BA Brasil  
CEP 40210-000

<sup>3</sup> Universidade Católica de Salvador (UCSAL)  
Pós-Graduação em Ambiente, Território e Sociedade  
Av. Prof. Pinto de Aguiar, 2589  
Pituaçu  
Salvador BA Brasil  
CEP 41740-090

<sup>4</sup> Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Geociências  
Departamento de Geoquímica  
Rua Barão de Gemoabo s/n  
Campus Ondina  
Salvador BA Brasil  
CEP 40170-115

\* Autor correspondente:  
jeronimo@ufba.br

## Copyright

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.



## RESUMO

As águas subterrâneas do Aquífero Bambuí, de natureza cárstica e fraturada, localizado na região sudoeste da Bahia, tem sido cada vez mais utilizada no abastecimento populacional, muito em função da crescente escassez das águas superficiais, decorrente de grandes períodos de estiagem. O conhecimento da composição físico-química e isotópica das águas subterrâneas contribui para que ocorra uma gestão adequada desse importante bem natural. Para realizar essa pesquisa, foram coletadas 15 amostras de águas para análises físico-químicas e isotópicas, em poços tubulares perfurados em rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí de idade neoproterozoica. Os resultados analíticos permitiram realizar a classificação hidrogeoquímica quanto à presença de íons maiores dissolvidos nas águas, além de análise estatística para o entendimento do processo de salinização. A qualidade dessas águas foi definida a partir dos padrões de potabilidade, de acordo com os parâmetros físico-químicos indicados pela legislação nacional e internacional de saúde e meio ambiente. Para determinar as assinaturas isotópicas, foram utilizados os isótopos estáveis deutério e oxigênio 18 ( $\delta^{2}\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ), sugerindo assim a dinâmica de recarga e descarga destas águas.

**Palavras-Chave:** Águas Subterrâneas, Aquífero Bambuí.

## ABSTRACT

The groundwater of Bambuí Aquifer, of karstic and fractured nature, located in the southwestern region of Bahia state, has been increasingly used in the population supply, due to the rising scarcity of surface waters as a result of great drought periods. The knowledge of chemical, physical-chemical and isotopic composition of groundwater contributes to the proper management of this important natural resource. To achieve this research, there were collected 15 groundwater samples in tubular wells contained in neoproterozoic carbonate and pelitic-carbonate rocks of Bambuí Group, for chemical, physicochemical, and isotopic analyzes. The analytical results allowed the hydrogeological control on the presence of larger ions dissolved in the waters, as well as statistical analysis for the understanding of salinization process. The quality of these waters was defined based on adequacy assessments for use, as regards potability standards, according to the chemical and physical-chemical parameters indicated by national and international health and environmental legislation. To determine the isotopic signatures, the stable isotopes deuterium and oxygen 18 ( $\delta^{2}\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ) were used, thus suggesting the dynamics of recharge and discharge of these waters.

**Keywords:** Groundwater; Bambuí Aquifer.

## 1. INTRODUÇÃO

Quando explorada de forma sustentável e segura, as águas subterrâneas proporcionam uma importante alternativa de fonte hídrica para o abastecimento comunitário em regiões carbonáticas com recorrentes e longos períodos de baixa precipitação pluviométrica. Entretanto, essas águas podem provocar eventualmente uma série de prejuízos e outros inconvenientes aos usuários, tais como: entupimentos em tubulações, especialmente de água quente, já que altas temperaturas aceleram o processo de incrustação; danificação de equipamentos elétricos como resistências de chuveiros, lavadoras de roupa, lava-louças, metais sanitários e outros, em função da calcificação dos mesmos; diminuição da vida útil de metais sanitários e maior custo com reparos e manutenção; manchas em roupas, principalmente brancas; manchas em metais, vidros e cerâmicas e ressecamento da pele e dos cabelos.

Sendo assim, esse artigo apresenta os resultados obtidos com os estudos hidrogeoquímicos e de isótopos estáveis:  $^2\text{H}$  (deutério) e  $^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$ ), provenientes de análises de águas subterrâneas do sistema aquífero Bambuí, na região oeste do estado da Bahia. Esse sistema aquífero é composto essencialmente por rochas sedimentares carbonáticas e pelito-carbonáticas, que constituem as unidades Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré.

O sistema aquífero Bambuí é morfologicamente heterogêneo com alta variação ocasionada pela sua natureza cárstica e fraturada de suas rochas, resultando em regiões com diferentes graus ou níveis de carstificação e fraturamento. Na região oeste da Bahia, a maior parte do sistema aquífero Bambuí apresenta um elevado grau de carstificação em virtude do grande volume de rochas carbonáticas

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área desta pesquisa compreende os municípios de Santa Maria da Vitória, Bom Jesus da Lapa, Carinhanha e Cocos, que se situam na porção oeste do Estado da Bahia (Figura 1). O clima predominante varia do semiárido a semiúmido (IBGE, 2012), com período de seca bem definido entre os meses

presentes nas formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (ZOBBY *et al.*, 2004; GONÇALVES, 2014).

Em relação à classificação hidroquímica, salinidade e qualidade, estudos anteriores (GONÇALVES, 2014; CUNHA *et al.*, 2022), demonstram que as águas do sistema aquífero são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas, com predomínio dos tipos cálcicos. Apresenta caráter levemente alcalino, com significativo teor de sólidos totais dissolvidos (STD), refletindo a interação da água com a rocha calcária (RAMOS; PAIXÃO, 2003; CUNHA *et al.*, 2022). Segundo Oliveira *et al.*, (2007), estas águas não são indicadas para o consumo humano devido à alta concentração de carbonato de cálcio e magnésio, porém poderiam ser utilizadas para atividades agropecuárias e abastecimento doméstico.

As investigações convencionais são, muitas vezes, insuficientes para compreensão da evolução das águas subterrâneas. Esse conhecimento complementar pode ser obtido usando o auxílio dos métodos de investigação isotópica. Os isótopos estáveis da molécula da água, ou dissolvidos nesta, variam previsivelmente no ciclo hidrológico (CLARK; FRITZ, 1997). Publicações sobre isótopos estáveis na região de pesquisa, revelam uma contribuição da recarga pelas águas das chuvas locais, com baixa evaporação e rápida infiltração (CAMURUGY, 2009; GONÇALVES, 2014).

Este trabalho pretende investigar a qualidade e a dinâmica de recarga das águas subterrâneas do Aquífero Bambuí, contribuindo com informações que podem orientar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos destes sítios do semiárido do Oeste do Estado da Bahia, Brasil.

de maio e outubro e temporada de chuvas entre os meses de novembro e abril. Em relação a geomorfologia da área tem-se na porção ocidental a predominância de relevo tabular característico das camadas arenosas do Grupo Urucuia, apresentando as maiores cotas altimétricas da região (aproximada-

mente 830 m). Na porção central e leste, o relevo é levemente ondulado, tendendo a plano à medida que se aproxima do vale do São Francisco (ANDRADE; CASCAES,

1990). A Serra do Ramalho, na porção central da área de estudo, representa a principal feição geomorfológica da região.

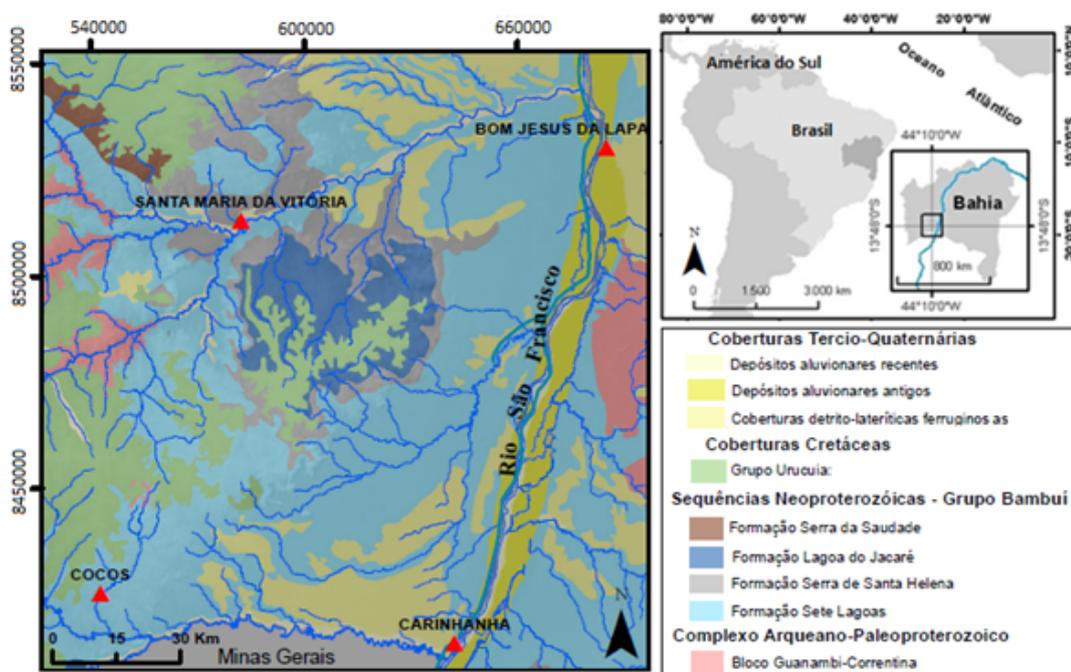


Figura 1  
Localização e Unidades Geológicas da área da pesquisa.

Em termos geológicos a área está inserida no contexto geotectônico da Bacia intracratônica do São Francisco, sendo constituída essencialmente por litotipos carbonáticos e pelito-carbonáticos do Grupo Bambuí, de idade neoproterozoica, pertencente ao Supergrupo São Francisco. Localmente, o Grupo Bambuí está estratigraficamente depositado sobre o embasamento Arqueano-Paleoproterozoico do Cráton São Francisco, parcialmente coberto pelos arenitos cretáceos do Grupo Urucuaia e pelos sedimentos terció-quaternários (DARDENNE, 1978; MISI *et al.*, 2007).

A espessura da plataforma carbonática representa uma seção com cerca de aproximadamente 400 e 350 metros (MISI *et al.*, 2007; REIS, 2013) fazendo parte da bacia hidrográfica do São Francisco (figura 1).

Devido à sua variação litológica e ao posicionamento estrutural, o sistema aquífero Bambuí é dividido nas unidades hidrogeológicas cárstica e pelito-carbonática (GONÇALVES, 2014). Localmente predomina a unidade aquífera cárstica, formada

pelos litotipos carbonáticos da Formação Sete Lagoas e Formação Lagoa do Jacaré. Subordinada e por vezes intercalada à unidade cárstica, ocorre a unidade pelito-carbonática compreendida basicamente pela ocorrência das rochas pelíticas de natureza fraturada, das formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena. Devido a essa alternância litológica do Grupo Bambuí, podem ocorrer aquíferos suspensos associados a aquícludes na zona superior do sistema aquífero. Nesta porção da bacia hidrográfica do São Francisco encontram-se importantes rios e riachos que desaguam nos cursos principais como o Rio Corrente e o Rio Carinhanha. As nascentes desses rios, localizadas na porção oeste do rio São Francisco, representam surgências de águas subterrâneas do aquífero Urucuaia, sendo uma das fontes de recarga do aquífero Bambuí em decorrência do seu posicionamento litoestrutural. Todo esse recurso hídrico vem sendo utilizado extensivamente pela agricultura extensiva de soja, milho, algodão, dentre outras, principalmente sobre o Platô do Urucuaia.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

As unidades geológicas e aquíferas foram divididas de acordo com o mapeamento geológico, na escala 1:1000.000, disponível na base SIG (sistema de informação geográfica) do Serviço Geológico do Brasil-CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), assim como o mapeamento geológico, na escala 1:30.000 realizado por Reis (2013) na região do município de Santa Maria da Vitória e pelo mapeamento hidrogeológico na escala 1:1000.000 realizado por Gonçalves (2014) na região de Serra do Ramalho.

O mapa potenciométrico foi confeccionado com base em informações contidas nas fichas de poços tubulares do SIAGAS/CPRM (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e CERB (Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia), utilizando os dados sobre o nível estático e cota altimétrica.

Foram coletadas 15 amostras de águas subterrâneas em poços tubulares, para análise química e isotópica no mês de maio de 2017.

A localização dos pontos amostrados é apresentada na figura 2. Durante a coleta, foram medidos *in situ* os parâmetros físico-químicos temperatura, condutividade elétrica (CE), pH e sólidos totais dissolvidos (STD), utilizando o medidor multiparâmetros Multi water Quality Checker U-50 Series, fabricado pela HORIBA. As águas foram armazenadas em recipientes de 500 mL (polietileno), para análises de cátions e ânions, e de 50 mL (âmbar), destinados às análises isotópicas. Os recipientes foram lacrados e conservados

sob refrigeração, para posterior encaminhamento ao laboratório.

As análises químicas foram realizadas no laboratório do Núcleo de Estudos Ambientais (NEA) do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A determinação dos cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) e ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{F}^-$ ) foi realizada por cromatografia iônica, enquanto a dos ânions ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ) foi feita por titulação. Os resultados químicos foram tratados com uso dos softwares Qualigraf 2009 e Diagraphers 6.5. O tratamento estatístico foi realizado utilizando o Excel 2013 e a ferramenta Action 2.8. Para confecção dos mapas foi utilizado o Arcgis10.1®. As águas foram avaliadas segundo os padrões de qualidade para consumo humano e pecuário em conformidade com as normas ambientais e de saúde pública da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2003), Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde.

Os valores dos isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  foram determinados no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UFBA. As análises foram realizadas usando o espectrômetro de massa. A incerteza média associada a estes resultados é de 0,1‰ para as medidas de  $^{18}\text{O}$  e de 1‰ para as determinações de  $^2\text{H}$ . O comportamento das análises isotópicas foi abordado cartesianamente, permitindo comparação com a linha meteórica global, e em mapa, permitindo observar a distribuição espacial das concentrações ao longo da área.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 CLASSIFICAÇÃO HIDROQUÍMICA

A água subterrânea, importante fonte hidrológica, pode conter íons dissolvidos em teores adversos à saúde (HIRATA, 2003). Os parâmetros químicos e físico-químicos são afetados ou induzidos por atividades antrópicas, como práticas agrícolas, despejo de esgoto e lixo (CARREIRA *et al.*, 2014).

Os resultados químicos das 15 amostras estão representados na Tabela 1. Em relação à classificação hidroquímica, o diagrama

triangular de Piper e as relações iônicas características (figuras 2 e 3) indicam que na área de estudo predominam as águas do tipo bicarbonatadas cálcicas -  $\text{Ca}^{2+}(\text{HCO}_3^-)_2$  - em 67% dos poços estudados, ocorrendo também as bicarbonatadas magnesianas -  $\text{Mg}^{2+}(\text{HCO}_3^-)_2$  em 20% e bicarbonatadas sódicas -  $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-$  - em 13% dos poços (Figura 3). A ordem relativa de concentração em miliequivalente por litro (meq/L) é dada

por  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  maior em 100% das amostras coletadas e  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  maior que todos os cátions para 87% das amostras.

Estes valores refletem o predomínio da dissolução de rochas carbonáticas.

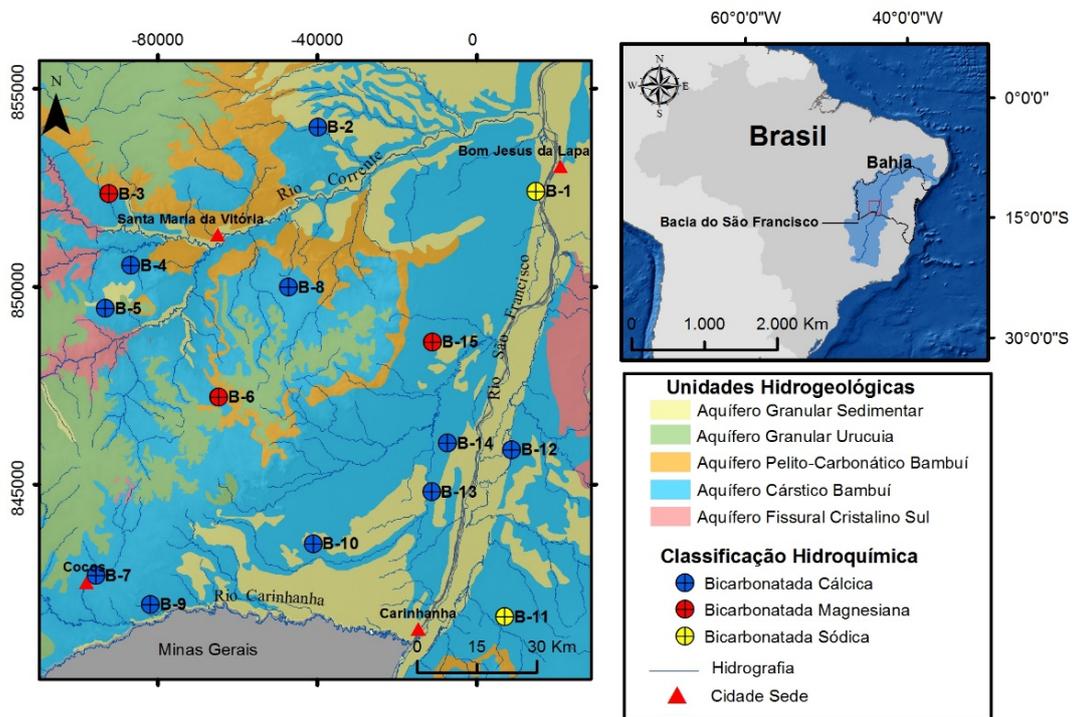


Figura 2  
Mapa Hidrogeológico e tipo de águas subterrâneas da área estudada.

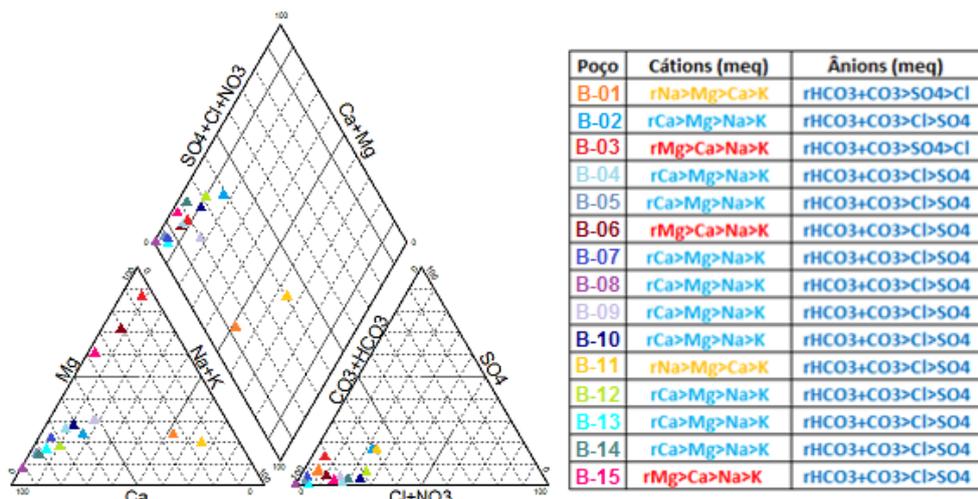


Figura 3  
Diagrama de Piper e relações iônicas características das águas subterrâneas na área da pesquisa.

A maior frequência de águas bicarbonatadas cálcicas, em toda área de estudo (figuras 2 e 3), evidencia a interação entre a água subterrânea e níveis de calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ ), comum em toda região. Entretanto águas bicarbonatadas magnesianas indicam a influência de níveis de calcário dolomítico, descritos no membro

superior da Formação Sete Lagoas (Martin, 2011), ocorrendo preferencialmente em áreas próximas ao contato entre as unidades aquífera cárstica e pelito-carbonática. As águas bicarbonatadas sódicas sugerem a presença e influência de águas meteóricas infiltradas no aquífero carbonático.

## 4.2 ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS

Os resultados analíticos das águas subterrâneas estão representados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Parâmetros físico-químicos e dados químicos das águas subterrâneas dos domínios Santa Maria da Vitória/Cocos, Bahia.

Amostras	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Alc (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	STD (mg/L)	CE (µg/cm)	pH	T (°C)
B-01	12,2	7,0	29,1	1,0	255,6	9,8	16,7	0,4	0,7	0,6	150,0	248,0	6,4	26,2
B-02	46,5	11,1	14,2	1,2	330,1	65,3	70,5	6,2	0,5	<0,25	664,0	725,0	6,7	27,6
B-03	5,3	52,4	8,7	0,9	650,0	14,7	80,4	14,6	0,5	<0,25	579,0	905,0	7,4	24,7
B-04	37,2	8,9	5,2	0,7	456,4	45,7	3,9	20,9	<0,25	<0,25	477,0	746,0	7,4	27,6
B-05	61,0	6,5	2,4	<0,25	425,7	10,9	1,0	4,4	<0,25	<0,25	354,0	552,0	7,3	27,2
B-06	24,9	52,0	9,3	1,3	631,1	34,7	26,2	16,9	0,9	<0,25	594,0	927,0	7,3	24,9
B-07	42,3	7,5	3,1	<0,25	225,8	2,1	7,2	3,3	1,2	<0,25	344,0	537,0	7,4	26,5
B-08	102,1	5,1	0,9	<0,25	174,0	<0,25	0,9	<0,25	<0,25	13,2	547,0	856,0	7,2	25,1
B-09	29,0	10,0	9,9	2,5	515,2	53,3	20,8	10,4	0,3	0,7	511,0	798,0	7,2	27,1
B-10	29,7	7,9	5,7	<0,25	466,9	57,5	13,3	55,9	<0,25	<0,25	496,0	775,0	7,3	29,3
B-11	24,4	19,5	119,9	1,5	616,6	142,1	136,8	4,3	1,0	<0,25	715,0	1120,0	7,7	28,8
B-12	74,8	11,2	10,7	2,6	356,3	73,1	26,5	0,5	0,5	<0,25	388,0	606,0	7,5	27,5
B-13	21,3	2,8	1,8	<0,25	77,9	1,6	1,3	<0,25	0,3	<0,25	184,0	282,0	7,9	29,1
B-14	78,4	7,8	3,9	0,8	360,4	44,9	10,4	12,9	0,4	<0,25	364,0	569,0	7,2	31,7
B-15	20,1	20,4	1,8	<0,25	384,0	27,0	8,3	17,2	0,4	<0,25	477,0	745,0	7,4	28,9
VCH	75,0	50,0	200,0			250,0	250,0	10,0	0,8		1000,0		6,0-9,5	
VDA							1000,0	90,0	2,0					
VIR						100,0			1,0					

O limite de detecção mínimo (Ldm) para a alcalinidade foi 2 mg/L, e para os íons foi de 0,25 mg/L. **VCH** - Valor máximo permitido para Consumo Humano, **VDA** - Valor máximo permitido para Dessedimentação Animal, **VIR** - Valor máximo permitido para Irrigação, de acordo com WHO (2003) e CONAMA N°396/2008

O pH das águas subterrâneas apresenta caráter neutro a levemente alcalino, com pH total variando entre 6,4 e 7,9 (sendo 87% das amostras com valores entre 7 e 7,9). A temperatura das águas oscilou entre 24,7° e 31,7°C, com predomínio das águas de maiores temperaturas nos poços localizados em áreas topograficamente mais rebaixadas, como no caso da planície do Rio São Francisco. A condutividade elétrica (CE) apresentou grande espectro de variação, com valores entre 248 µS/cm e 1120 µS/cm. Em relação aos STD, os resultados das análises demonstram alta variação, com valores entre 150 e 715 mg/L, sendo 60% das amostras com STD variando de 0 a 500 mg/L e 40% do tipo água salobra (500 a 1000 mg/L).

Para a matriz de correlação de *Spearman* (tabela 2) utilizou-se a condutividade elétrica (CE) e os demais parâmetros analisados, acrescentando-se os valores dados amostrados com os valores analíticos dos poços cadastrados no banco de dados da CERB/SIAGAS, totalizando 65 resultados analíticos, visando obter valores estatísticos mais confiáveis com dados coletados ao longo do tempo, não refletindo naturalmente o momento da coleta dessa pesquisa. O resultado final revela que a CE apresenta moderadas correlações com os parâmetros alcalinidade ( $r_s = 0,52$ ), sulfato ( $r_s = 0,65$ ) e cloreto ( $r_s = 0,66$ ), com probabilidade de acontecer superior a 99% considerando  $n = 65$ .

**Tabela 2** - Matriz de Correlação - Coeficiente de correlação de *Spearman*.

	Ca	Na	K	Mg	Cl	F	Alc	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	STD	CE
Ca	1,00										
Na	0,10	1,00									
K	0,18	<b>0,74</b>	1,00								
Mg	0,34	0,28	0,27	1,00							
Cl	0,09	0,50	0,39	0,29	1,00						
F	-0,14	0,33	0,26	0,05	-0,03	1,00					
Alc	-0,16	0,02	-0,01	0,30	0,26	0,33	1,00				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,25	<b>0,71</b>	<b>0,52</b>	0,45	<b>0,67</b>	0,21	0,10	1,00			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,20	-0,27	-0,32	0,16	0,32	0,00	0,34	0,07	1,00		
STD	0,19	0,41	0,33	0,43	<b>0,68</b>	0,22	0,50	<b>0,66</b>	0,31	1,00	
CE	0,20	0,47	0,35	0,43	<b>0,66</b>	0,23	<b>0,52</b>	<b>0,65</b>	0,28	<b>0,96</b>	1,00

**Alc** - alcalinidade, **STD** - sólidos totais dissolvidos, **CE** - condutividade elétrica

Os parâmetros que apresentaram maior correlação com a salinidade das águas foram analisados por meio da técnica de regressão linear múltipla sequencial. Essas variáveis independentes foram escolhidas em função das suas moderadas correlações com a CE (variável dependente). Os cálculos mostraram um valor de R<sup>2</sup> ajustado de 0,83 e indicaram que as variáveis independentes explicam cerca de 83% da variabilidade da condutividade elétrica. A equação linear múltipla obtida foi:

$$CE = 249 + 2,9Cl + 1,5SO_4 + 0,8(HCO_3 + CO_3)$$

Esta equação mostra que existe uma associação relativa da salinidade (CE) com o

Cl<sup>-</sup> (55,8%), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (28,8%) e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (15,4%). A relação da CE com alcalinidade é explicada através da interação água/rocha carbonática, predominante na área de estudo. Com o sulfato a correlação pode ser ocasionada em razão da liberação de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) proveniente do intemperismo de níveis piritosos, comuns em ambientes endocársticos e que evoluem por oxidação para sulfatos. Não podemos descartar também a possibilidade da presença de níveis com barita (BaSO<sub>4</sub>) e Gipsita (CaSO<sub>4</sub>. 2H<sub>2</sub>O). Finalmente, a maior correlação da CE com cloreto pode estar associada com a influência da recarga por infiltração de águas meteóricas no sistema aquífero.

### 4.3 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A importante discussão em relação aos padrões de qualidade e uso das águas subterrâneas decorre da crescente utilização desses recursos para o consumo humano, dessedentação animal e irrigação, tendo em vista que a área da pesquisa se encontra inserida no polígono das secas do Brasil.

Na análise dos parâmetros físico-químicos, levou-se em consideração os limites máximos de tolerância (LMT) preconizados tanto pela legislação nacional quanto internacional de saúde e meio ambiente, ou seja, Organização Mundial da Saúde (WHO, 2003), Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde.

Em relação ao fluoreto, estudos específicos demonstraram que a concentração ótima na água para o padrão de consumo precisa ser (re)ajustada localmente em função da temperatura média anual do ar. Coutinho (2014) pesquisou a fluorose dentária na região e determinou que o limite máximo de fluoreto para o consumo humano é de 0,8 mg/L, no Oeste da Bahia, levando em conta os dados de temperaturas. Entretanto a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde determina que o limite máximo para o fluoreto seja de 1,5 mg/L. Neste trabalho por conta da área de estudo estar inserida em uma região com relatos de casos de fluorose dentária, foi estabelecido como limite máximo de fluoreto o valor de 0,8 mg/L, preconizado por Cruz *et al.* (2015).

Os resultados analíticos demonstram que o maior problema com a potabilidade para o consumo humano nas águas é relativo ao ânion nitrato, que possui concentrações acima do que é permitido na legislação em 47% das análises. O caso mais alarmante refere-se ao poço B-10, que apresenta concentração de 55,9 mg/L. Considerando que este poço está localizado dentro do povoado de Santa Luzia no município de Carinhanha, a ocorrência do elevado teor de nitrato é resultante de fontes da contaminação local, decorrentes da ausência completa de saneamento básico. Outras variáveis que excederam aos limites de potabilidade são o fluoreto em 20% das amostras e o cálcio e magnésio, ambas em

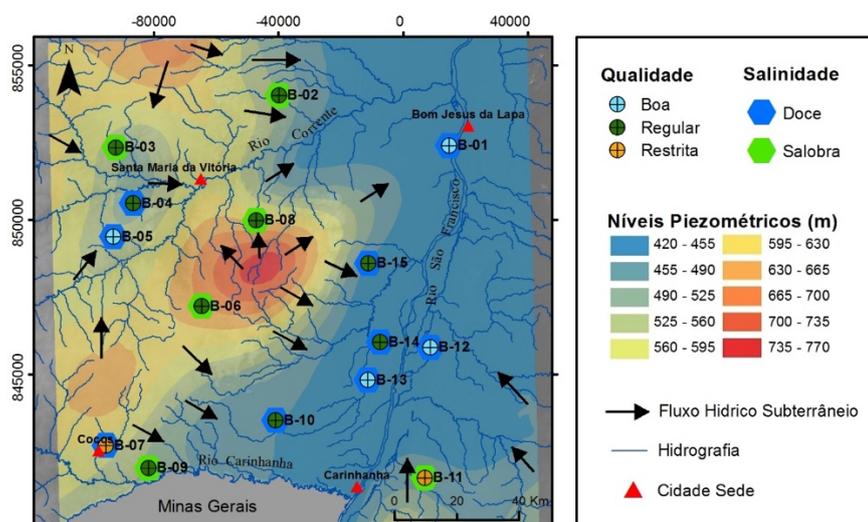
13%. Os valores excedentes de fluoreto nas águas de três poços são relativos ao mineral fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), que ocorre disseminado nos calcários e dolomitos da Formação Sete Lagoas (MISI *et al.*, 2007). Já os teores elevados de cálcio e magnésio, verificados em quatro poços, foram associados à interação entre a água subterrânea e as rochas carbonáticas. Observou-se alguns poços com águas salobras (6), com valores encontrados de STD superiores ao limite de potabilidade, ou seja, 500 mg/L (Portaria 888/2021 do M.S.). Em relação à dessedentação de animal e irrigação, de acordo com CONAMA Nº 396/2008, os resultados demonstram que todos os poços estão com águas aptas para o consumo animal e que apenas dois poços (B-07 e B-11) não possuem águas apropriadas para agricultura por conta da relativa concentração elevada de fluoreto.

Para facilitar o entendimento sobre a qualidade das águas subterrâneas da área de estudo, foram individualizadas unidades de qualidade físico-química, sendo elas, boa, regular e restrita (figura 4). As unidades de qualidade dessa pesquisa foram separadas essencialmente de acordo com os limites preconizados pela legislação e pelo estudo específico no caso do fluoreto, assemelhando-se à divisão utilizada por Oliveira *et al.* (2007) para o “Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas-IQNAS”. As águas de boa qualidade físico-química da região, estão representadas pelos poços B-01, B-05, B-12 e B-13. São consideradas como águas subterrânea de boa qualidade todas aquelas que possuem as variáveis em apreço abaixo do limite máximo permitido para todos os usos e que sejam classificadas como água doce em relação à salinidade. Vale salientar que essas águas de qualidade boa são consideradas apropriadas para o consumo humano, de acordo com a legislação brasileira, entretanto deve-se alertar que para a ingestão dessas águas subterrâneas faz-se necessário também a realização de análises microbiológicas afim de verificar a existência de coliformes e bactérias heterotróficas entre outros microrganismos. De acordo com os resultados analíticos, essas águas podem ser utilizadas para

higiene pessoal e preparo de alimentos. A água com melhor qualidade química e físico-química entre todos os poços foi encontrada no poço B-13 (Localidade de Cara Suja)

As águas mais comuns na área de pesquisa, remetem às de qualidade regular, recomendadas basicamente para dessedentação animal e irrigação, podendo ser utilizadas também para limpeza doméstica. Estas águas apresentam altos teores de nitrato

(valores entre 10 e 90 mg/L) e fluoreto intermediário (0,8 a 1,0 mg/L). As águas de qualidade restrita ocorrem em dois poços: B-07(Cubículo) e B-11 (Canto do Riacho), sendo apropriadas apenas para consumo animal e para irrigação devido à elevada concentração de fluoreto (1 a 2 mg/L). No geral quanto menor as concentrações de sais e mais baixos forem os níveis piezométricos melhor a qualidade das águas (figura 4).



**Figura 4**  
Mapa potenciométrico e de qualidade das águas subterrâneas da área da pesquisa.

#### 4.4 USO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS ( $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ )

O  $^{18}\text{O}$  e o  $^2\text{H}$  (deutério) são os isótopos estáveis mais pesados do oxigênio e do hidrogênio respectivamente. A abundância relativa destes isótopos na água varia em função de sua trajetória no ciclo hidrológico. O fracionamento isotópico na água decorre, principalmente, dos processos físicos de mudança de fase, como evaporação e condensação. Urge ressaltar que processos

químicos e biológicos produzem variações diminutas (SANTIAGO *et al.*, 2008).

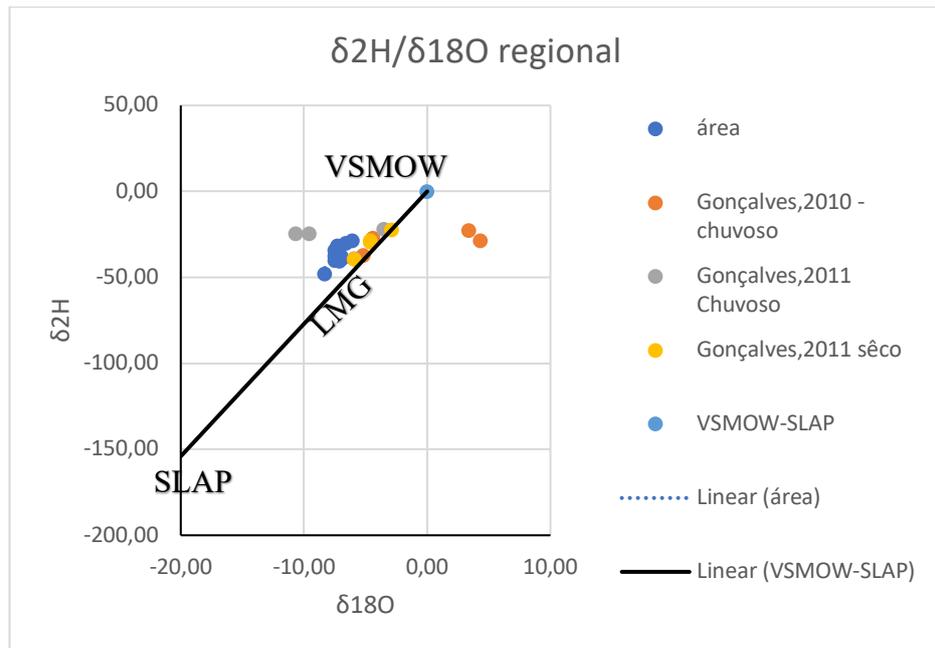
As medidas isotópicas das águas subterrâneas da área de estudo estão apresentadas na tabela 3. As amostras possuem valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  variando de -8,30‰ a -6,06‰ e -47,9‰ a -28,7‰, respectivamente.

**Tabela 3 - Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  nas águas subterrâneas da área de estudo.**

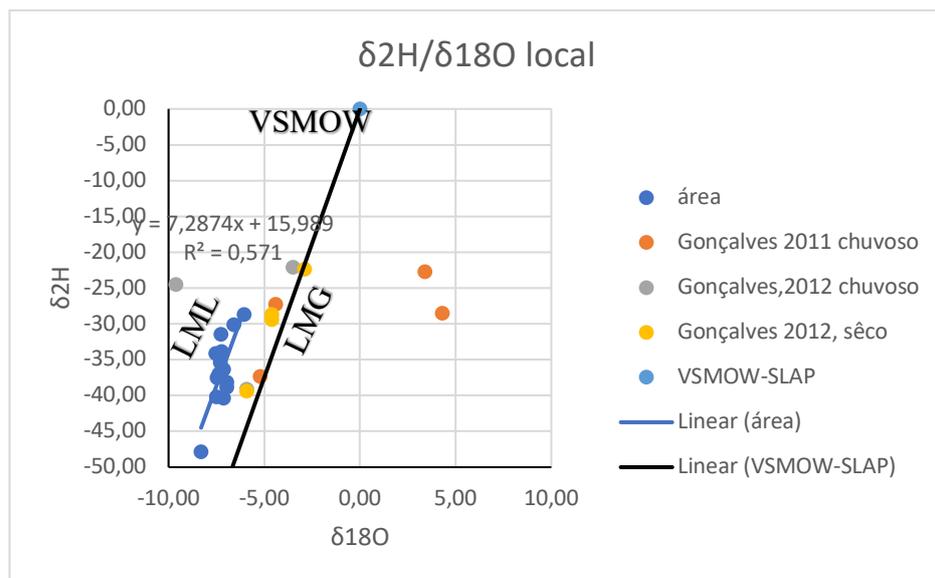
Isótopo	B-01	B-02	B-03	B-04	B-05	B-06	B-07	B-08	B-09	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-6,94	-6,06	-6,58	-7,31	-7,13	-7,47	-7,35	-7,48	-6,97	-7,24	-7,13	-8,30	-7,28	-7,27	-7,51
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-38,9	-28,7	-30,1	-37,0	-36,4	-37,5	-37,0	-40,2	-38,1	-33,9	-40,4	-47,9	-35,4	-31,5	-34,1

Os resultados obtidos em maio/2017 para as 15 amostras coletadas demonstram que todas as águas apresentam valores negativos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , significando águas empobrecidas em isótopos pesados em relação ao padrão VSMOW (*Vienna Standart Mean Ocean Water*). Os dados isotópicos foram

plotados nos diagrama de  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  (figuras 5 e 6, geral e local, respectivamente), apresentando a linha meteórica geral (figura 5) e local (LML - figura 6). A título de comparação, foram lançados os dados isotópicos de Gonçalves, *et.al* (2020).



**Figura 5**  
Diagrama de  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  (regional) LMG.



**Figura 6**  
Diagrama de  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  (local).

O empobrecimento em isótopos estáveis em relação ao VSMOW, como é observado na figura 5, pode ser atribuído à depleção de valores dos isótopos pesados em decorrência do efeito continental, como preconiza Gonçalves *et al.* (2020), baseado nas premissas de Gat (1976). Por outro lado, esta constatação ratifica a proposta de Gonçalves *et al.* (2020), que apregoam que as águas subterrâneas da área desta pesquisa são relacionadas ao deslocamento dos vapores de água do oceano Atlântico Tropical, da direção leste para o oeste.

Aplicando-se a análise de variância de comparações múltiplas (ANOVA) nas médias dos dados analisados nesta pesquisa, obteve-se valores para o  $^{18}\text{O}$  de  $p=0,36$  e para o  $^2\text{H}$   $p=0,72$ . Comparando-os com os resultados de Gonçalves *et al.* (2020), obteve-se valores semelhantes, comprovando que os dados analíticos isotópicos desta pesquisa e os obtidos por aqueles autores não diferem significativamente.

A Linha Meteorica local (LML) é definida pela equação obtida por regressão linear:

$$\delta^2H = 7,64\delta^{18}O + 18,4\text{‰}$$

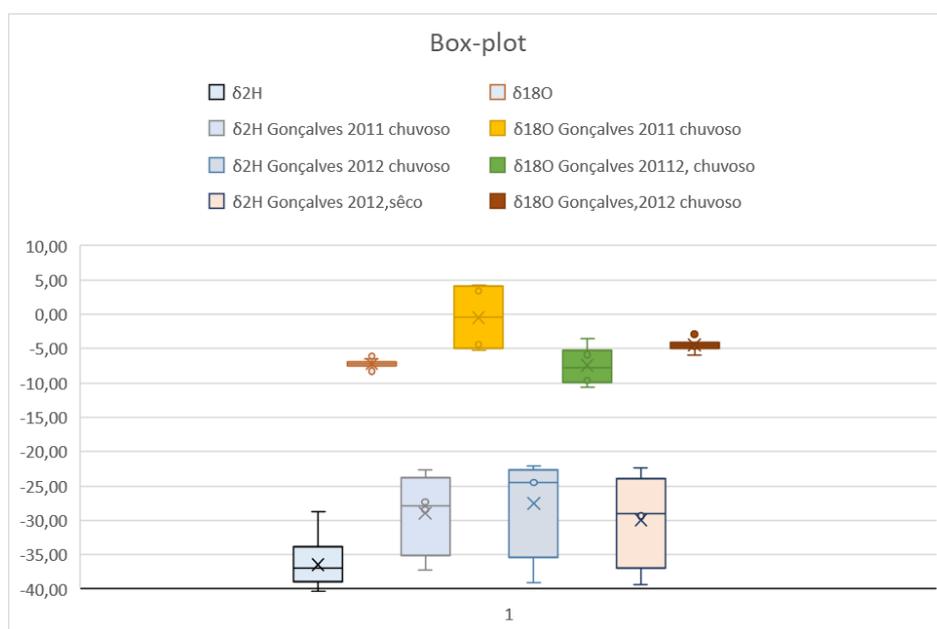
estando paralela e menos positiva em relação a linha meteórica global (LMG) de regressão linear (Figura 6).

$$\delta^2H = 8,13\delta^{18}O + 10,8\text{‰}$$

O deslocamento para esquerda da linha meteórica global, com o empobrecimento do isótopo  $^{18}O$ , pode ser atribuído aos fenômenos evaporação significativa durante

a recarga, infiltrando rapidamente no aquífero cárstico através de dolinas, sumidouros, fraturas e diaclases, comportamento similar ao observado por Gonçalves *et al.* (2020), para períodos secos. São águas geralmente bicarbonatadas sódicas.

O diagrama tipo boxplot é apresentado na figura 7, com os dados da área comparados às proposições de Gonçalves *et al.* (2020). Nos dados observa-se uma similaridade das razões isotópicas da área da pesquisa com os dados do período seco de 2012.



**Figura 7**  
Diagrama tipo boxplot dos  $\delta^2H$  versus  $\delta^{18}O$ .

## 5. CONCLUSÃO

As águas subterrâneas dos domínios do polígono Santa Maria da Vitória/Cocos/Carinhonha/Bom Jesus da Lapa são predominantemente classificadas como águas bicarbonatadas cálcicas, ratificando os resultados anteriores. Em termos locais, relações iônicas atribuem uma frequência de 67% das amostras como águas bicarbonatadas cálcicas, 20% como bicarbonatadas magnesianas e 13% bicarbonatadas sódicas, revelando um cenário típico dos terrenos carbonáticos calcícos predominantes

A presença de sódio sugere a contribuição de recarga pela infiltração das águas meteóricas no sistema aquífero. No local do Assentamento Bom Sucesso em São

Félix do Coribe, as análises apresentam elevado teor em fosfato, podendo indicar a ocorrência mineral de fosfato à montante do fluxo subterrâneo.

Os resultados físico-químicos atribuem, de modo geral, as águas um pH neutro a levemente alcalino, com frequência de 60% de águas do tipo doce e 40% do tipo salobra (Portaria MS 888/2021). Foi possível evidenciar que as águas doces, tendem a ocorrer preferencialmente nos níveis piezométricos mais baixos, sugerindo influência do nível de base dos rios como diluidor das concentrações de sais. A matriz de correlação de *Spearman* identificou que os parâmetros que mais influenciam a condutividade elétrica e, conseqüentemente,

a salinidade, são a alcalinidade ( $r_s = 0,52$ ) devido a relação água/rocha, sulfato ( $r_s = 0,65$ ) associado ao ácido sulfúrico proveniente de níveis piritosos, comuns em ambientes endocársticos, e cloreto ( $r_s = 0,66$ ), parâmetro esse com maior coeficiente de correlação, relacionado com a infiltração direta da água da chuva na zona vadosa através do epicarste.

Por meio da técnica de regressão linear múltipla sequencial esses parâmetros independentes citados acima e responsáveis pela salinidade explicam cerca de 83% da variabilidade da condutividade elétrica, existindo a probabilidade de  $Cl^-$  contribuir com 55,8%, o sulfato com 28,8% e o  $HCO_3^- + CO_3^{2-}$  com 15,4% dessa salinidade.

Sobre a qualidade das águas para consumo humano, aproximadamente em metade dos poços tubulares (47%) elas estão contaminadas por nitrato, 20% por fluoreto, 13% por excesso de cálcio e 13% para magnésio.

Com pequenas restrições, as águas subterrâneas da região podem ser utilizadas para agricultura e dessedentação animal.

Com relação aos aspectos isotópicos, as águas subterrâneas sofreram evaporação

durante os processos de infiltração, sobretudo nos períodos secos. A distribuição dos isótopos estáveis mostrou uma tendência ao empobrecimento em isótopos pesados ( $\delta^{18}O$  e  $\delta^2H$ ) no sentido NW para SE, indicando recarga inicial preferencialmente na porção noroeste da área. Os isótopos demonstram também que no mesmo período de chuvas as precipitações ocorreram inicialmente na porção norte/noroeste do polígono, seguidas de um evento de precipitação com composição isotópica similar, porém mais negativo, na porção sudoeste da área. A Serra do Ramalho na porção central da área marca um divisor de águas que separa os dois eventos de precipitação no mesmo período de chuvas.

Outra hipótese aventada é de que na região da sub-bacia do Rio Corrente, na porção noroeste da área de estudo, as águas infiltradas sofreram mais evaporação do que aquelas águas infiltradas ao longo da planície do Rio São Francisco. Possivelmente ocorreu a mistura de águas com pesos isotópicos diferentes, resultante da alta infiltração de águas por feições cársticas, como sumidouros e dolinas, comuns em toda região.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B. M.; CASCAES, O. S. F. Panorama hidrogeológico do Grupo Bambuí no Oeste da Bahia. In: 6º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas-ABAS, Porto Alegre, 1990. **Anais...** Porto Alegre, 1990. p.50-57.
- BRASIL MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria 888 de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para abastecimento doméstico, na forma do anexo XX da Portaria 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde. [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html)
- CAMURUGY, E. B. **Uso da hidroquímica e isótopos estáveis ( $\delta D$  e  $\delta^{18}O$ ) no estudo da qualidade e origem das águas subterrâneas do aquífero cárstico da região oeste do Estado da Bahia.** Monografia de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Salvador, 2009. 66 p.
- CARREIRA, P. M.; MARQUES, J. M.; NUNES, D. Source of groundwater salinity in coastline aquifers based on environmental isotopes (Portugal): Natural vs. human interference. A review and reinterpretation. **Applied Geochemistry** 41:163–175, 2014
- CLARK, I. D.; P. FRITZ. **Environmental isotopes in hydrogeology.** CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1997.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências. Disponível em: <http://conama.gov.br>.
- COUTINHO, C. A. M. **A fluorose dentária na região cárstica do município de Santana-BA: definição de áreas de risco para consumo humano das águas**

- subterrâneas com base nos dados hidroquímicos e epidemiológicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 2014. 164 p.
- CRUZ, M. J. M.; COUTINHO, C. A. M.; GONÇALVES, M. V. P. The Dental fluorosis on Santana karst region, Bahia State, Brazil. **Journal of Geography and Earth Sciences December (3)2**: 51-67, 2015
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: XXX Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Recife. **Anais... Recife1978**. v. 2, p. 597-610
- CUNHA, M. P.; GONÇALVES, M. V. P.; CRUZ, M. J. M. Contribuição ao entendimento dos processos naturais de dissolução de rochas carbonáticas na bacia sedimentar de Irecê, Bahia, NE do Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, 36:e-22002, 2022.
- GAT, J. T. Comments on the stable isotope method in regional groundwater investigations. **Water Resources Research** 7, 980-993, 1976.
- GONÇALVES, M. V. P., **Flúor nas águas subterrâneas do Aquífero Bambuí no Sudoeste da Bahia (Brasil)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. 193 p: Color. 2014.
- GONÇALVES, M. V. P.; SANTOS, R. A.; RAMOS-JR. A. B. S.; BATISTA, F. S., SILVA, A. C. M.; CRUZ, M. J. M.; COSTA, A. B. Caracterização isotópica e qualidade das águas subterrâneas no município de Serra do Ramalho, Bahia, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, 34(1): 38-52, 2020.
- HIRATA, R. Recursos Hídricos. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Eds.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, São Paulo, p. 422 - 444. 2003
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **IBGE Cidades@**. Acessível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwin dow.htm?>. Acessado em: 02.02.2012.
- MISI A.; KAUFMAN A. J.; VEIZER J.; POWIS K.; AZMY K.; BOGGIANI P. C.; GAUCHER C.; TEIXEIRA J. B. G.; SANCHES A. L.; IYER S. S. S. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. **Chemical Geology**, 237:143-167, 2007.
- OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I., SILVA, A. G. L. S. Mapeamento dos Aquíferos do Estado da Bahia utilizando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS. **Revista Água Subterrânea**, 21(1):123-137, 2007.
- RAMOS, M. L. S.; PAIXÃO, M. M. O. M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas - Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), 2003.
- REIS, C. **Geologia, Sistemas Depositionais e Estratigrafia Isotópica do Grupo Bambuí na Região de Santa Maria da Vitória, BA**. Dissertação. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, 97 p. 2013.
- SANTIAGO M. F.; FRISCHKORN H.; SILVA C. M. S. V. Métodos isotópicos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL-FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. (Orgs). **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações**. CPRM (Serviço Geológico do Brasil). 3ª Edição Capítulo 4.3, p. 255-270. 2008.
- ZOBY, J. L. G.; MATOS, B. A.; CONEJO, J. G. Disponibilidade de Águas Subterrâneas na Bacia do Rio São Francisco. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. São Paulo. 2004 21pp.
- W.H.O. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. Recommendations. Addendum. Geneva. 3rd edition.v.1 2003