



# Análise geoquímica das águas subterrâneas no município de Boquira, no semiárido baiano - Brasil

Maria da Conceição Rabelo Gomes<sup>1\*</sup>  
Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto  
Melo<sup>1</sup>

Máira Sampaio da Costa<sup>1</sup>  
José Angelo Sebastião Araújo dos  
Anjos<sup>1</sup>

Michael Mitchell Araújo Trinta<sup>2</sup>  
Itabaraci Nazareno Cavalcante<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geologia  
Rua Barão de Jeremoabo, s/n  
Campus Universitário de Ondina  
Salvador BA Brasil.  
CEP 40170-020

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará  
Programa de Pós-Graduação em Geologia,  
Centro de Ciências  
Avenida Humberto Monte, s/n  
Campus Universitário do Pici  
Fortaleza, CE Brasil.  
CEP 60.440-554

\* Autora correspondente  
conceicaoabelo@yahoo.com.br

## RESUMO

A análise geoquímica foi realizada na porção centro-sul do estado da Bahia, no semiárido baiano, onde afloram o Complexo Paramirim, Unidade Boquira, Granito Boquira, Granito Veredinha, Serra do Espinhaço, Coberturas detríticas e Depósitos aluvionares. A Unidade Boquira é conhecida pelas mineralizações chumbo-zincíferas. Nessa unidade operou a mina Boquira, considerada a maior mina de chumbo e zinco do Brasil até ser subitamente abandonada, o que deixou expressivo passivo ambiental de metais tóxicos como chumbo, zinco, prata, bário, cobre, cromo e níquel. Para caracterizar a água subterrânea utilizaram-se 16 parâmetros físico-químicos de 24 poços, obtidos por meio da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia - CERB. Sua classificação foi feita com o Diagrama de Piper e as relações iônicas em meq/L. Para avaliar a qualidade da água utilizou-se a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde e Organização Mundial da Saúde. Com o modelo hidrogeoquímico PHREEQC 3.5 calculou-se o índice de saturação dos elementos analisados. Os resultados mostraram predominância de águas cloretadas cálcicas (71% das amostras), com relações iônicas do tipo  $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+$  e  $rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ . A modelagem geoquímica indicou calcita ( $CaCO_3$ ), dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) e quartzo ( $SiO_2$ ) como principais minerais com tendência de precipitação. Os dois primeiros foram associados à dissolução dos carbonatos da Unidade Boquira e o terceiro aos quartzitos da Formação Serra do Espinhaço. As concentrações de cálcio e cloreto apresentaram 54% e 25% das amostras acima do Valor Máximo Permitido para consumo humano, respectivamente, representando um fator de risco à saúde da população da área.

**Palavras-Chave:** Hidroquímica, Índice de saturação, Interação água-rocha.

## ABSTRACT

The geochemical analysis was carried out in the center-south portion of the state of Bahia, in the semi-arid region of Bahia, where outcrop the Paramirim Complex, Boquira Unit, Boquira Granite, Veredinha Granite, Serra do Espinhaço, detritus coverings and alluvial deposits. The Boquira Unit is known for lead-zinc mineralization. In this unit operated the Boquira mine, considered the largest lead and zinc mine in Brazil, until it was suddenly abandoned, leaving significant environmental liabilities of toxic metals such as lead, zinc, silver, barium, copper, chromium and nickel. To characterize the groundwater 16 physical-chemical parameters from 24 wells were used, obtained from the Water and Sanitation Engineering Company of Bahia - CERB. Its classification was made in the Piper Diagram and the ionic relations in meq/L. To evaluate the quality of the water we used the Consolidation Ordinance nº 5/2017 of the Ministry of Health and World Health Organization. With the PHREEQC 3.5 hydrochemical model, the saturation index of the analyzed elements was calculated. The results showed predominance of calcium chloride waters (71% of the samples), with ionic relations of type  $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+$  and  $rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ . Geochemical modeling indicated calcite ( $CaCO_3$ ), dolomite ( $CaMg(CO_3)_2$ ) and quartz ( $SiO_2$ ) as the main minerals with a tendency to precipitation. The first two were associated with the dissolution of the Boquira Unit carbonates and the third one with the quartzites of the Serra do Espinhaço Formation. The concentrations of calcium and chloride showed 54% and 25% of the samples above the Maximum Allowable Value for human consumption, respectively, representing a risk factor to the health of the population in the area.

**Keywords:** Hydrochemistry, Saturation Index, Water-Rock Interaction.

## Copyright

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



## 1 INTRODUÇÃO

A geoquímica das águas subterrâneas, também conhecida como hidrogeoquímica, é uma ciência que aborda a composição química da água aos processos e reações no ambiente de subsuperfície. O objetivo principal dessa ciência é a compreensão da origem e evolução química dos constituintes presentes na água, resultantes dos processos físico-químico-biogeoquímicos que ocorrem durante o fluxo da água subterrânea nos aquíferos desde a zona de recarga até os exutórios naturais. Em geral a composição da água subterrânea é função do solo ou da rocha, através dos quais ela percola, e da interação entre água, minerais, gases e micro-organismos (MESTRINHO, 2008).

Segundo Mestrinho (2008), a modelagem hidrogeoquímica é uma ferramenta importante para obter informações, dentre outras, sobre o balanço de massa dos minerais dissolvidos ou precipitados, especiação dos íons, índice de saturação em relação aos minerais e estado de redox da água.

Para a realização da modelagem hidrogeoquímica é comum a utilização do *software* PHREEQC (PARKHURST; APPELO, 1999) que efetua cálculos de concentração molar, atividade iônica e coeficiente de atividade das espécies químicas na água, fornecendo os valores dos índices de saturação (IS) da fase sólida de vários minerais em equilíbrio com a solução aquosa nos pontos amostrados.

A determinação dos índices de saturação, relativos às diferentes fases minerais permite avaliar os estados de equilíbrio termodinâmico da solução (DUQUE, 2005). Muitas vezes, entretanto, não há equilíbrio e o estado de saturação apenas indica a direção em que os processos podem ocorrer; logo, para a subsaturação, a dissolução é esperada, sendo que a supersaturação, no entanto, sugere a precipitação (APPELO; POSTMA, 2005). Nos últimos anos, diversos autores (MACHADO *et al.*, 2004; LECOMTE *et al.*, 2005; NASCIMENTO *et al.*, 2008; BHARDWAJ *et al.*, 2010; BELKHIRI *et al.*, 2011; NASCIMENTO; ALVES, 2011; KASHOUTY, 2012; KIANG *et al.*, 2016; SALLES *et al.*, 2018) vêm utilizando o PHREEQC para produzir modelos hidrogeoquímicos, através de métodos como a especiação química, a determinação dos índices de saturação dos minerais, a abordagem direta e a abordagem inversa.

A composição geoquímica das águas subterrâneas do município de Boquira é controlada por condições específicas que integram fatores hidroclimáticos e aspectos geológicos da área, influenciando diretamente na qualidade das águas (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Historicamente esse município é conhecido por problemas com escassez de recursos hídricos, baixos índices de precipitações anuais, altas taxas de insolação e evaporação. Isso culmina muitas vezes na utilização de fontes de água impróprias para o consumo humano por carência de alternativas tanto pela população como por governanças. As principais unidades aflorantes na área de pesquisa correspondem às rochas do Complexo Paramirim (migmatito, gnaiss granítico, ortognaiss granodiorítico), Unidade Boquira (formações ferríferas, carbonatos, quartzitos e xistos), Granito Boquira (metagranodiorito, metamonzogranito), Granito Veredinha (metagranodiorito, formação ferrífera bandada), Serra do Espinhaço (quartzito feldspático, metaconglomerado, mica quartzito, filito, biotita xisto, metarriolito, metadacito, metapiroclástica, diabásio, gabro), coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (silte, areia, argila) e depósitos aluvionares (silte, cascalho, argila) (CPRM, 2010). Ressalta-se que a Unidade Boquira é amplamente conhecida pelas mineralizações chumbo-zincíferas, a qual operou por mais de 30 anos (1960 e 1992) e é considerada a maior mina de chumbo e zinco do Brasil (DALTRO, 2017).

Segundo Lima (2003 *apud* DALTRO, 2017), a ocorrência da água subterrânea armazenada nos aquíferos da região semiárida se dá predominantemente em zonas subverticais estreitas, associadas aos intensos conjuntos de falhamento, com cerca de 10 a 15 metros de profundidade, sempre abaixo de um manto incipiente de rocha alterada.

Para investigar a dissolução e a precipitação de minerais nesses aquíferos, procurou-se primeiramente caracterizar as razões iônicas e classificar os tipos iônicos da água subterrânea, e em seguida realizar o modelamento hidrogeoquímico para verificar os valores do índice de saturação dos minerais comuns nos aquíferos cristalinos da área.

Nesse contexto, essa pesquisa objetiva analisar os processos hidrogeoquímicos responsáveis pela composição das águas subterrâneas armazenadas nessas unidades geológicas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa utilizou-se o banco de dados hidroquímicos (16 parâmetros físico-químicos) da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia - CERB, com informações de 24 poços distribuídos no município de Boquira (Figura 1).

Os 16 parâmetros físico-químicos analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura (T), condutividade elétrica (CE), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), Carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), fluoretos (F), Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e ferro (Fe). Para a determinação dessas variáveis físico-químicas foram adotados métodos apropriados para cada tipo de análise, de acordo com os manuais do *Standard Methods of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

As razões iônicas das águas subterrâneas foram calculadas e analisadas com base na classificação adotada por Hem (1985), tais como:  $r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$ ,  $r\text{K}^+/r\text{Na}^+$ ,  $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$  e  $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$ , onde  $r = \text{meq/L}$ . Mestrinho (2008) mostra que as informações sobre a tipologia química da água junto às razões iônicas (meq/L) têm sido usadas para confirmar a análise química e auxiliar na dedução da rocha original.

Posteriormente, foi realizada uma classificação iônica das águas subterrâneas

utilizando o diagrama triangular de Piper com os valores dos componentes químicos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$  elaborado no programa *Diagrammes 3.0*.

Os resultados das análises foram comparados com a Portaria de consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017) e com recomendações da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) com objetivo de avaliar a adequação das águas subterrâneas para consumo humano.

Para a obtenção dos valores dos índices de saturação em cada ponto de amostragem utilizaram-se os parâmetros que envolvem as condições ambientais tais como: pH, massa específica da água e temperatura. Além desses, foram utilizados os elementos maiores e menores, tais como: cálcio, magnésio, sódio, potássio, sulfato, cloreto, bicarbonato, carbonato, ferro, sílica, fluoreto, nitrato e nitrito. Para efetuar essa modelagem hidrogeoquímica utilizou-se o *software PHREEQC 3.5* (*Department of Geosciences North Dakota State University*). O PHREEQC é um *software* projetado para executar uma ampla variedade de cálculos hidrogeoquímicos de baixa temperatura. Ele se fundamenta no modelo de associações iônicas em meio aquoso sendo capaz de realizar cálculos de especiação e índices de saturação, entre outros.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 RAZÕES IÔNICAS

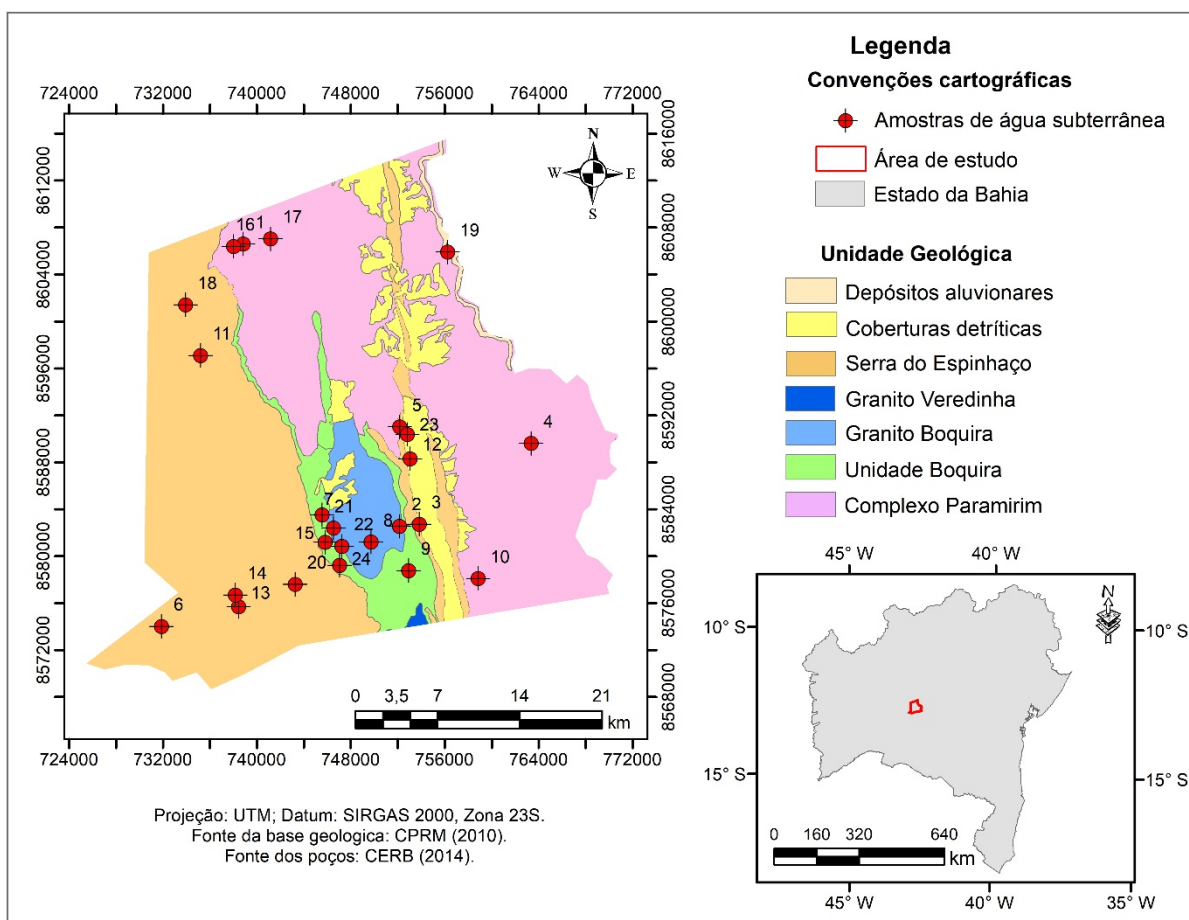
Na Tabela 1 são mostradas as principais razões iônicas calculadas para as águas subterrâneas no município de Boquira.

Custódio e Llamas (1983) consideram que as razões iônicas mais importantes em estudos hidrogeoquímicos são  $r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$  e  $r\text{K}^+/r\text{Na}^+$ .

**Tabela 1** - Principais razões iônicas médias nas águas subterrâneas do município de Boquira com a classificação de Hem (1985).

Razão Iônica	Resultado (média)	Tipologia química
$r\text{Mg}^{+2}/r\text{Ca}^{+2}$	0,28	Água de circulação em rocha de composição granítica
$r\text{K}^+/r\text{Na}^+$	0,09	Água de circulação em rocha de composição granítica
$r\text{Na}^+/r\text{Cl}^-$	14,84	Precipitação de sais de Na e fluxo através de rochas cristalinas ou vulcânicas
$r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$	1,21	Sem indicação

Nota: Valores em meq/L de 24 amostras subterrâneas.



**Figura 1**  
Localização da área de pesquisa e poços analisados.

A razão  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  predomina com valores inferiores a 0,30 (63%), comprovando que essas águas são provenientes do Granito de Boquira (metagranodiorito e metamonzogranito) e do Complexo Paramirim (rochas de composição granítica). Barison (2003) mostra que valores maiores são provenientes de águas continentais e quanto mais próximos de 1 maior a influência de terrenos dolomíticos. Ressalta-se ainda que, quando ocorre a precipitação de carbonato de cálcio, há um aumento na razão iônica e o inver-

so ocorre em caso de dissolução da calcita.

A razão  $rK^+/rNa^+$  apresenta valores de até 0,32. Segundo Custódio (1965), nas águas subterrâneas, em geral, a relação  $rK^+/rNa^+$  apresenta valores menores que 1 devido à fixação de  $K^+$  nos argilominerais; é tanto menor quanto maior a concentração de sais; e menor na água do que na rocha-mãe. Se houver aportes artificiais de  $K^+$ , pode ocorrer diminuição na concentração desse elemento químico no sentido do fluxo.

### 3.2 TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os tipos de águas subterrâneas observadas nas amostras são predominantemente cloretadas cálcicas (71% das amostras) e ocorrem nas coberturas detriticas (amostra 23), Serra do Espinhaço (amostras 3, 5, 6, 11, 18 e 20), Granito Boquira (amostras 8, 21 e 22), Unidade Boquira (amostras 2, 15 e 24) e Complexo Paramirim (amostras 1, 10, 16 e 17), com relações iônicas do tipo  $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+$  e  $rCl > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ . 29% das amostras são

bicarbonatadas cálcicas captando água das coberturas detriticas (amostra 12), Serra do Espinhaço (amostras 13 e 14), Unidade Boquira (amostras 7 e 9) e Complexo Paramirim (amostras 4 e 19), com relações iônicas do tipo  $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+$  e  $rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$  (Figuras 2 e 3). Assim, o cátion predominante nas águas subterrâneas na área é o cálcio ( $Ca^{2+}$ ), enquanto o cloreto ( $Cl^-$ ) e bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) representam os ânions que ocorrem com maior

frequência. Resultados semelhantes também foram encontrados por Gonçalves *et al.* (2018).

O cálcio é considerado um dos elementos mais abundantes na maioria das águas e rochas. Ele possui moderada a elevada solubilidade, sendo comum precipitar como carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), e é o principal responsável pela dureza da água (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983). Apesar de não haver um consenso com relação aos valores de referência para cálcio em água, a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) estabelece um Valor Máximo Permissível (VMP) para cálcio de 75 mg/L, uma vez que não existem estudos de toxicidade do cálcio, sendo o maior problema para as águas portadoras de limites maiores do que 75 mg/L. De acordo com Custódio e Llamas (1983) o cálcio tem a função de manter os ossos saudáveis, além de atuar no mecanismo de coagulação do sangue, controlar impulsos nervosos e as contrações musculares. Em grandes quantidades, pode causar dores musculares, fraqueza, sede, desidratação, enjoo e pedras nos rins, e sua ausência pode provocar raquitismo e osteoporose. O teor de cálcio nas amostras analisadas variou de 4 mg/L (coberturas detriticas) a 605 mg/L (Unidade Boquira), estando 54% das amostras acima do VMP para consumo humano estabelecido pela Organização Mundial da Saúde. Também na pesquisa de Daltro *et al.* (2020) as águas que apresentaram maiores teores de cálcio estão predominantemente situadas na Unidade Boquira, assim como próximos à mina à céu aberto e no interior da mina subterrânea.

O cloreto é o ânion mais frequente nas águas, uma vez que muito solúvel e de difícil precipitação, além de não sofrer oxidação e redução em águas naturais. As águas subterrâneas apresentam, geralmente, teores de cloretos inferiores a 100 mg/L. Contudo, em função de sua alta solubilidade e do lento movimento das águas no aquífero, podem

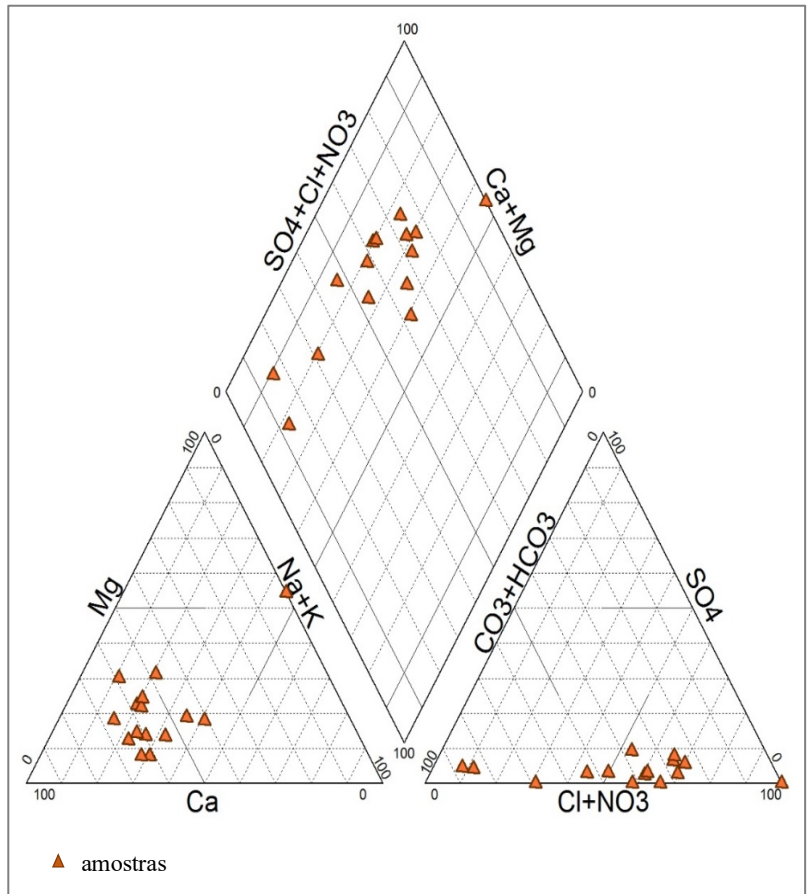
ocorrer aumentos gradativos e constantes de seus teores na direção do fluxo subterrâneo. Assim, valores acima de 100 mg/L podem ser tomados como referência para indicar essa tendência (SANTOS, 2008). Segundo Matta (2002) este parâmetro constitui importante padrão de potabilidade, uma vez que provoca sabor nas águas, corrosões em estruturas de metal, incrustações em tubos de revestimentos, aumento da dureza das águas e ações negativas no metabolismo de organismos. As concentrações de cloreto oscilaram de 4 mg/L (coberturas detriticas) a 609 mg/L (Unidade Boquira), com 25% das amostras acima do VMP recomendado pela Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde (250 mg/L de Cl). As altas concentrações de cloreto podem ser responsáveis pelo aumento gradativo de salinidade das águas subterrâneas e, conseqüentemente, pelo aumento de Sólidos Totais Dissolvidos (STD). A origem desse elemento na área pode estar vinculada à captação das águas subterrâneas no meio cristalino.

O íon bicarbonato não sofre oxidação nem redução em águas naturais, porém pode precipitar com muita facilidade como bicarbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) (SANTOS, 2008). Segundo Silva e Bonotto (2006) em águas que contêm elevadas concentrações de íons de bicarbonato, há tendência de precipitação do cálcio e do magnésio sob a forma de carbonatos reduzindo, então, a concentração desses elementos na solução do solo e, conseqüentemente, aumentando a proporção de sódio. Os menores valores de bicarbonato indicam áreas de recarga, com crescimento de acordo com o sentido do fluxo subterrâneo. Na área, as amostras apresentaram valores de 4 mg/L (coberturas detriticas) a 560 mg/L (Unidade Boquira).

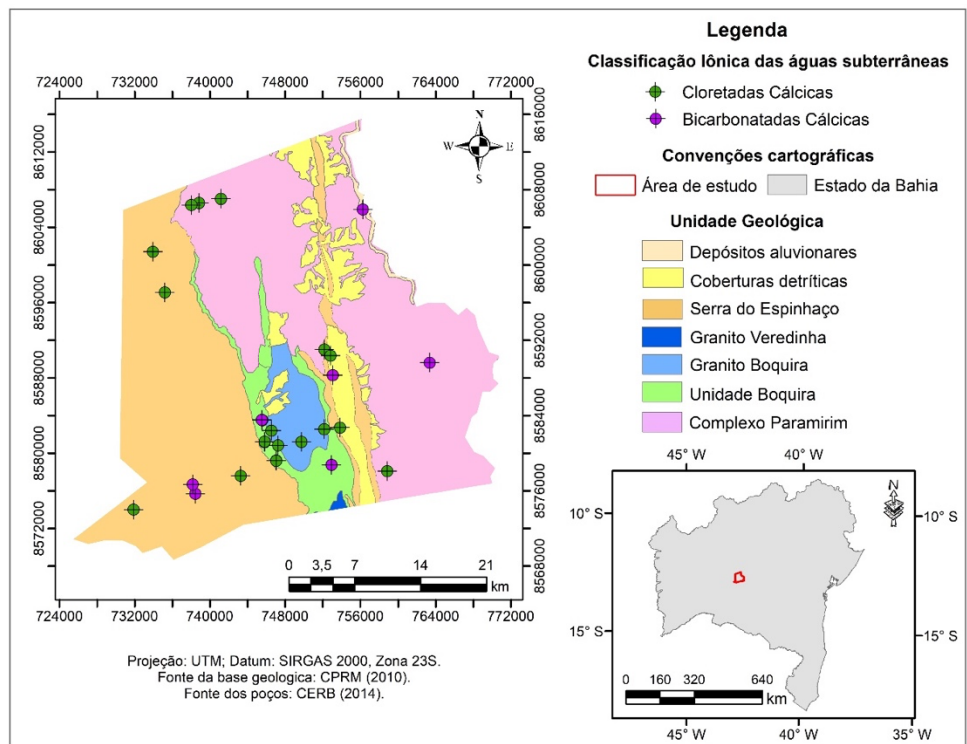
### 3.3 MODELAGEM HIDROGEOQUÍMICA

Para a determinação do índice de saturação (IS) o *software* PHREEQC calcula a concentração molar, atividade iônica e o coeficiente de atividade das espécies químicas na água subterrânea. Em seguida, os valores dos índices de saturação da fase sólida de vários minerais em equilíbrio com a solução aquosa nas amostras são obtidos. O *software* apresenta no final o valor do produto da atividade iônica (PAI) dos componentes analisados dividido pela constante de equilíbrio termodinâmica (K) a temperatura da amostra (t). Para facilitar a leitura e interpretação dos resultados o programa apresenta os cálculos

do índice de saturação em valores logarítmicos, ou seja:  $\log IS = \log PAI - \log K_t$ . Quando os valores de IS são positivos, existem condições de supersaturação das espécies químicas havendo com isso a possibilidade de formação da fase sólida mineral a partir da solução aquosa por meio de uma reação química inversa. Enquanto os valores negativos de IS representam uma solução subsaturada, sem condições de formação da fase sólida mineral. Quando o IS é igual a zero, a solução está em equilíbrio químico, ou seja, a velocidade da reação direta (fase sólida mineral  $\rightarrow$  solução) é igual à reação inversa (solução  $\rightarrow$  fase



**Figura 2**  
Classificação das águas subterrâneas segundo o Diagrama de Piper



**Figura 3**  
Distribuição espacial da Classificação iônica das águas subterrâneas

sólida mineral) (NASCIMENTO *et al.*, 2008).

Devido às incertezas inerentes ao cálculo do índice de saturação, provenientes de resultados muitas vezes duvidosos das análises químicas e do cálculo do valor da constante de equilíbrio do mineral, recomenda-se por motivo de segurança que os valores do IS considerados estejam acima de  $\pm 0,5$  (DEUTSCH 1997 apud NASCIMENTO *et al.*, 2008) (Tabela 2).

As condições de saturação e formação dos carbonatos (Tabela 2 e Figura 4), a partir das

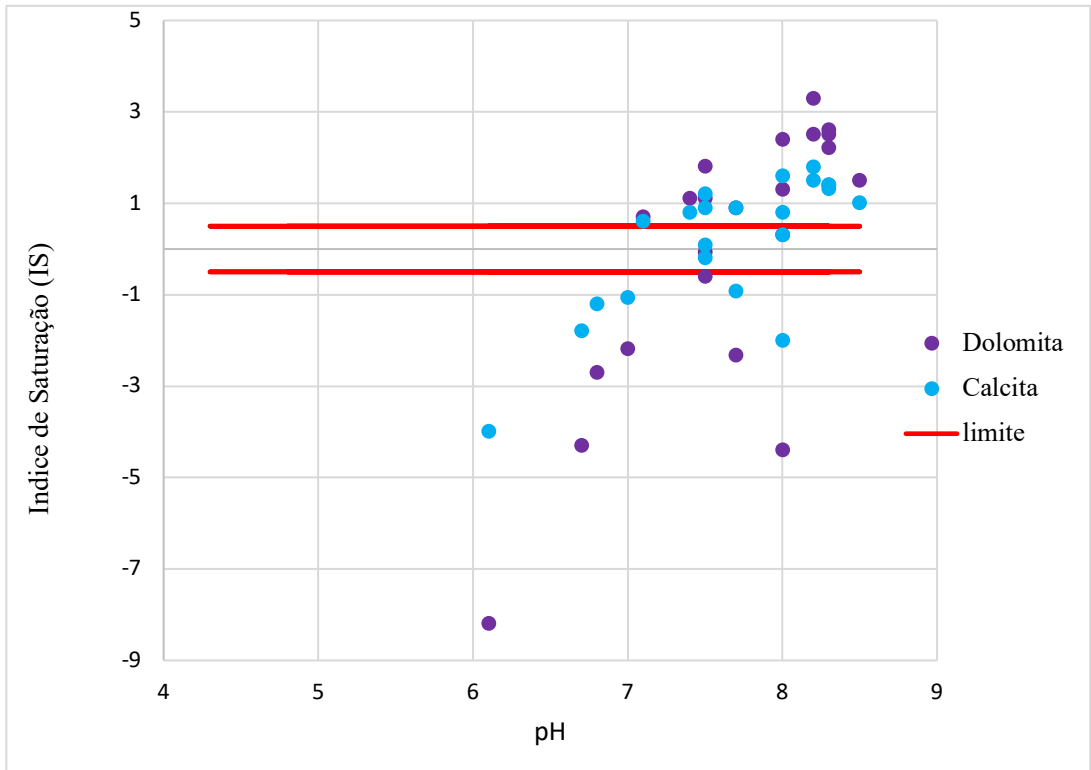
águas subterrâneas, ficaram mais evidenciadas nos poços que captam água do Complexo Paramirim (6 amostras), Unidade Boquira (3 amostras), Granito Boquira (3 amostras) e Serra do Espinhaço (1 amostra). A elevação do pH para valores  $\geq 7,5$  nessas amostras resultou no aumento do índice de saturação do bicarbonato na água nessas formações e, conseqüentemente, na precipitação da fase sólida mineral por meio de reações químicas inversas sob a forma de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ).

**Tabela 2** - Índices de saturação (IS) dos principais grupos de minerais extraídos do PHREEQC

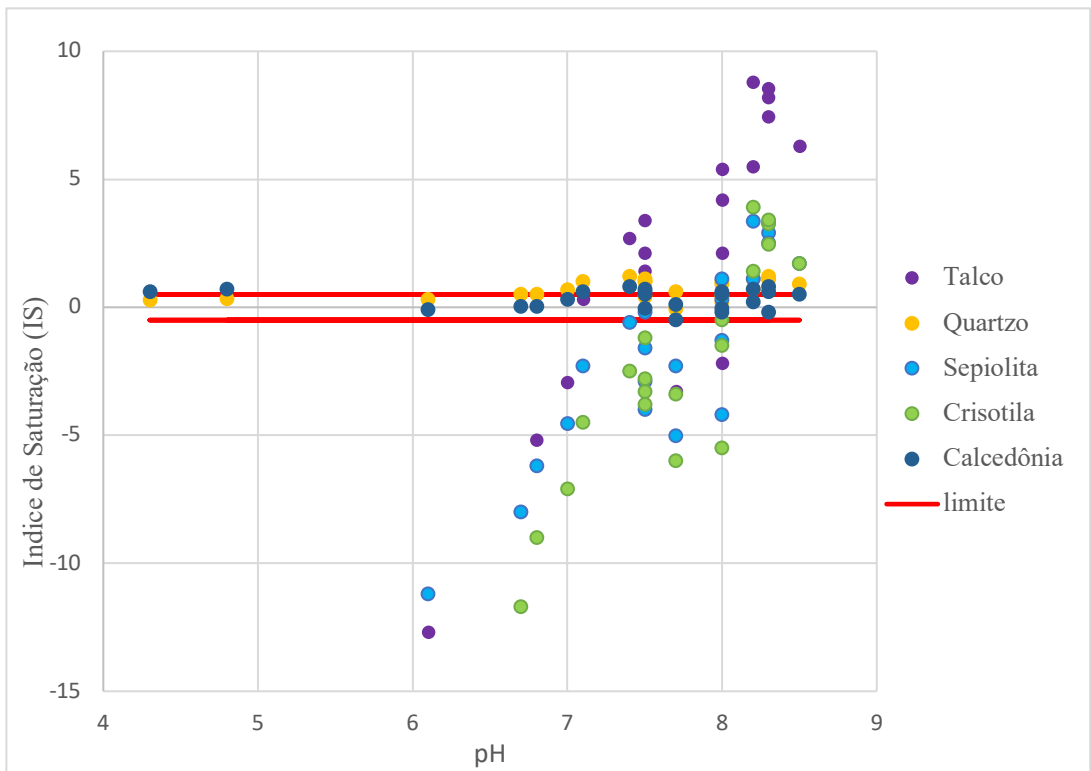
Amostra	Unidade Geológica	pH	Carbonatos ( $\text{CO}_3$ )			Silicatos ( $\text{SiO}_2$ )			
			Calcita	Dolomita	Talco	Quartzo	Calcedônia	Sepiolita	Crisotila
1	Complexo Paramirim	8,3	<b>1,40</b>	<b>2,50</b>	<b>8,20</b>	<b>1,10</b>	<b>0,60</b>	<b>2,90</b>	<b>3,26</b>
2	Unidade Boquira	8,2	<b>1,79</b>	<b>3,29</b>	<b>8,80</b>	<b>1,10</b>	<b>0,70</b>	<b>3,36</b>	<b>3,91</b>
3	Serra do Espinhaço	4,3	-	-	-25,70	0,28	<b>0,60</b>	-	-29,10
4	Complexo Paramirim	8,3	<b>1,32</b>	<b>2,21</b>	<b>7,45</b>	<b>1,08</b>	-0,20	<b>2,51</b>	<b>2,46</b>
5	Serra do Espinhaço	4,8	-	-	-20,46	0,32	<b>0,70</b>	-16,35	-23,95
6	Complexo Paramirim	7,0	-0,92	-2,32	-3,28	-0,08	-0,50	-5,03	-6,00
7	Unidade Boquira	7,0	-1,07	-2,19	-2,93	<b>0,68</b>	0,30	-4,55	-7,10
8	Granito Boquira	7,5	<b>0,80</b>	<b>1,10</b>	<b>2,70</b>	<b>1,20</b>	<b>0,80</b>	-0,60	-2,50
9	Unidade Boquira	7,1	-2,00	-4,40	-2,20	0,20	-0,20	-4,20	-5,50
10	Complexo Paramirim	8,3	<b>1,40</b>	<b>2,60</b>	<b>8,55</b>	<b>1,20</b>	<b>0,80</b>	<b>3,30</b>	<b>3,40</b>
11	Serra do Espinhaço	6,8	-1,20	-2,70	-5,20	<b>0,50</b>	0,03	-6,20	-9,00
12	Coberturas detríticas	6,7	-1,80	-4,30	-8,00	<b>0,50</b>	0,03	-8,00	-11,70
13	Serra do Espinhaço	7,0	0,30	0,30	<b>4,20</b>	<b>0,90</b>	<b>0,50</b>	0,30	-0,50
14	Serra do Espinhaço	7,3	-0,20	-0,60	<b>1,40</b>	<b>1,00</b>	<b>0,50</b>	-1,60	-3,30
15	Unidade Boquira	8,2	<b>1,50</b>	<b>2,50</b>	<b>5,50</b>	<b>0,70</b>	0,20	<b>1,10</b>	<b>1,40</b>
16	Complexo Paramirim	7,5	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,30</b>	<b>1,00</b>	<b>0,60</b>	-2,30	-4,50
17	Complexo Paramirim	8,0	<b>0,80</b>	<b>1,30</b>	<b>2,10</b>	0,40	-0,04	-1,30	-1,51
18	Serra do Espinhaço	7,4	0,08	-0,07	-0,20	0,40	-0,05	-2,90	-3,80
19	Complexo Paramirim	8,5	<b>1,00</b>	<b>1,50</b>	<b>6,30</b>	<b>0,90</b>	<b>0,50</b>	<b>1,70</b>	<b>1,70</b>
20	Serra do Espinhaço	7,7	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	0,10	-2,30	-3,40
21	Granito Boquira	7,5	<b>0,90</b>	<b>1,10</b>	<b>2,10</b>	<b>1,00</b>	<b>0,60</b>	-4,00	-2,80
22	Granito Boquira	8,0	<b>1,60</b>	<b>2,40</b>	<b>5,40</b>	<b>1,00</b>	<b>0,60</b>	<b>1,10</b>	<b>0,50</b>
23	Coberturas detríticas	6,1	-4,00	-8,20	-12,70	0,30	-0,10	-11,20	-16,20
24	Unidade Boquira	7,5	<b>1,20</b>	<b>1,80</b>	<b>3,40</b>	<b>1,10</b>	<b>0,70</b>	-0,20	-1,20

Dentre os minerais silicatados ( $\text{SiO}_2$ ) encontrados nas águas subterrâneas, o quartzo e a calcedônia (variedade criptocristalina do quartzo) são os que apresentaram os maiores equilíbrios químicos, com 71 e 54% das amostras analisadas, respectivamente (Figura 5), ou seja, a maioria das amostras estão supersaturadas em quartzo. Também 13% das amostras apresentaram supersaturação do

mineral talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ). Enquanto os minerais sepiolita ( $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ ) e crisotila ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) se encontram saturados em 29% das amostras, variando em média entre 2,3 e 2,4, respectivamente, com ocorrência no Complexo Paramirim (4 amostras), Unidade Boquira (2 amostras) e Granito Boquira (1 amostra).



**Figura 4**  
Índices de saturação das amostras de águas subterrâneas para os minerais carbonáticos extraídos do PHREEQC



**Figura 5**  
Índices de saturação das amostras de águas subterrâneas para os minerais silicáticos extraídos do PHREEQC



## 4 CONCLUSÕES

As águas subterrâneas analisadas do município de Boquira são predominantemente cloretadas cálcicas (71% das amostras) e ocorrem nas coberturas detríticas (6%), Serra do Espinhaço (35%), Granito Boquira (18%), Unidade Boquira (18%) e Complexo Paramirim (23%), com relações iônicas do tipo  $rCa^{2+} > rMg^{2+} > rNa^+$  e  $rCl > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ .

De acordo as razões iônicas  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  e  $rK^+/rNa^+$ , 63% das amostras de águas são provenientes do Granito Boquira e do Complexo Paramirim, ou seja, são águas que circulam em rochas de composição granítica.

A concentração de cálcio nas amostras analisadas variou de 4 mg/L (coberturas detríticas) a 605 mg/L (Unidade Boquira), estando 54% das amostras acima do Valor Máximo Permitido para consumo humano estabelecido pela Organização Mundial da Saúde, implicando assim um fator de risco à saúde da população que utiliza dessas águas. Ressalta-se que apesar da importância do cálcio na vida humana, tanto seu excesso quanto sua deficiência afetam a saúde, são exemplos desse impacto pedras nos rins e fraqueza óssea.

## 5 AGRADECIMENTOS

À Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia - CERB, pela disponibilização do banco de dados utilizado neste trabalho. Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente

Os teores de cloreto oscilaram de 4 mg/L (coberturas detríticas) a 609 mg/L (Unidade Boquira), com 25% das amostras fora do Valor Máximo Permitido para consumo humano. As altas concentrações de cloreto podem ser responsáveis pelo aumento gradativo de salinidade das águas subterrâneas e, conseqüentemente, pelo aumento de Sólidos Totais Dissolvidos. A origem desse elemento na área pode estar vinculada à captação das águas subterrâneas no meio cristalino.

Ressalta-se a necessidade de planejamento e gerenciamento desse recurso hídrico, a fim de se ter à captação e uso da água sob a óptica de desenvolvimento sustentável e qualidade de vida.

Os resultados obtidos pelo PHREEQC em relação aos índices de saturação mostram que os minerais de calcita ( $CaCO_3$ ), dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) e quartzo ( $SiO_2$ ) possuem uma tendência a se precipitarem (supersaturação). Os dois primeiros foram associados à dissolução dos carbonatos da Unidade Boquira e o terceiro relacionado aos quartzitos da Formação Serra do Espinhaço.

(NEHMA) da Universidade Federal da Bahia pela infraestrutura. Aos revisores anônimos da Revista *Geochimica Brasiliensis* pelas sugestões apresentadas.

## 6 REFERÊNCIAS

- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. Washington: D.C. 19.ed. 1998
- APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. (Eds.). **Geochemistry, groundwater and pollution**. A.A. Balkema (Taylor and Francis Group), Leiden The Netherlands. 558 pp. 2005
- BARISON, M. R. **Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 158 p. 2003.
- BELKHIRI, L.; BOUDOUKHA, A.; MOUNI, L.; BAOUZ, T. Statistical categorization geochemical modeling of groundwater in Ain Azel plain (Algeria). **Journal of African Earth Sciences**, 59: 140-148, 2011.
- BHARDWAJ, V.; SINGH, D. S.; SINGH, A. K. Hydrogeochemistry of groundwater and anthropogenic control over dolomitization reactions in alluvial sediments of the Deoria district: Ganga plain, India. **Environmental Earth Sciences** 59: 1099-1109, 2010
- BRASIL - Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida---o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acessado em 15 fev 2019.
- CERB - COMPANHIA DE ENGENHARIA HÍDRICA E DE SANEAMENTO DA BAHIA. 2014. Banco de dados de poços do município de Boquira, Bahia.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2010. Mapa Geodiversidade do Estado da Bahia, escala 1:2.500.000.

- CUSTÓDIO, E. (Ed.). **Notas sobre hidroquímica**. Comisaría de águas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona, 103 pp. 1965
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (Eds.). **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona, 2. ed., vol. 2. 1983
- DALTRO, R. R. **Impactos ambientais nos recursos hídricos por metais tóxicos: o caso do município de Boquira, no semiárido baiano**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 132 p. 2017
- DALTRO, R. R.; ANJOS, J. A. S. A. DOS; GOMES, M. DA C. R. Avaliação de metais pesados nos recursos hídricos do município de Boquira, no semiárido baiano – Brasil. **Geociências**, 39: 139-152, 2020
- DUQUE, J. M. P. **Hidrogeologia do sistema aquífero dos gabros de Beja**. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 389 p. 2005
- GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G. (Eds.). **Águas Subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2a ed. São Paulo, 496 pp. 2013
- GONÇALVES, M. V. P.; CRUZ, M. J. M.; ALENCAR, C. M. M., SANTOS, R. A., RAMOS JUNIOR, A. B. DA S. Geoquímica e qualidade da água subterrânea no município de Serra do Ramalho, Bahia (BR). **Eng. Sanit Ambient** 23: 159-172, 2018
- HEM, J. D. (Ed.). **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water**. Geological Survey Water-Supply Paper. Alexandria, 263 pp 1985.
- KASHOUTY, M. The hydrogeochemical evolution and modeling of the Quaternary aquifer west of the River Nile, El Minia district. **Arabian Journal of Geosciences**, 5:617-635, 2012
- KIANG, C. H.; STRADIOTO, M. R.; SILVA, F. P. Tipos hidroquímicos do sistema aquífero Bauru no estado de São Paulo. **Rev. Águas Subterrâneas**. 30: 224-245, 2016
- LECOMTE, K. L.; PASQUINI, A. I. E.; DEPETRIS, P. J. Mineral Weathering in a Semiarid Mountain River: Its assessment through PHREEQC inverse modeling. **Aquat Geochem**, 11: 173-194, 2005
- MACHADO, C. J. F.; SANTIAGO, M. M. F.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISHKORN, H. E FILHO, J. M. Hidrogeoquímica como indicador de interconexão entre aquíferos na chapada do Araripe utilizando o aplicativo phreeqc. **Rev. Águas Subterrâneas**, 18:79-87, 2004
- MATTA, M. A. DA S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da Região de Belém/Ananindeua - Pará/Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 292 p. 2002
- MESTRINHO, S. S. P. Geoquímica das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Eds.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**, CPRM e LABHID Rio de Janeiro: 3 ed., p.: 359-379, 2008
- NASCIMENTO, S. A. DE M.; BARBOSA, J. S. F.; CRUZ, M. J. M.; LIMA, C. M. DE. Hidrogeoquímica e índice de saturação dos minerais no sistema aquífero do Alto Cristalino de Salvador, Bahia. **Rev. Brasileira de Geociências** 39: 230-237, 2008
- NASCIMENTO, S. A. DE M.; ALVES, J. E. Caracterização hidrogeoquímica e evolução da água subterrânea na área do Polo industrial de Camaçari – Bahia. **Cadernos de Geociências** 8: 54-62, 2011
- PARKHURST, D. L.; APPELO, C. A. J. User guide to PHREEQC (version 2) – A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Water Resources Investigations Report, Denver, Colorado, p.: 95-4259, 1999
- SALLES, L. DE Q.; LEAL, L. R. B.; PEREIRA, R. G. F. DE A.; LAUREANO, F. V.; GONÇALVES, T. DOS S. Influência dos aspectos hidrogeológicos de aquíferos cársticos na evolução do relevo: porção central da chapada Diamantina, Bahia, Brasil. **Rev. Brasileira Geomorfologia**, 19: 93-106, 2018
- SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Organizadores). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, p.: 81–108, 2008
- SILVA, M. L. DA; BONOTTO, D. M. Hidroquímica elementar e dos Isótopos de urânio em águas subterrâneas da Formação Alter do Chão, Manaus (AM). **Rev. Brasileira de Geociências**, 36: 437-444, 2006
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water Quality**, 4 th. ed., 564 pp. 2011