



Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro
Hydrogeochemical and Isotopic Tools ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) Applied to Understanding the Processes of Groundwater Salinization in Proterozoic Carbonate Aquifers: Evidence from the Semi-Arid Region of Northeastern Brazilian

Lucas de Queiroz Salles¹; Luiz Rogério Bastos Leal²;
Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira²; Fernando Verassani Laureano⁴;
Sérgio Augusto de Moraes Nascimento²; Maria do Rosário Zucchi⁴ & Natanael da Silva Barbosa²

¹Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências,
Campus Universitário de Ondina, Ondina CEP: 40170-115 - Salvador, BA – Brasil

²Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências,
Rua Barão de Geremoabo, S/N Federação, CEP: 40050-090 - Salvador, BA – Brasil

³Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas e Saúde da PUC Minas,
Rua do Rosario 1081, Angola 32630-000 - Betim, MG – Brasil

⁴Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física,
Campus Universitário de Ondina, Ondina CEP: 40170-115 - Salvador, BA – Brasil
E-mails: lucassalles2008@gmail.com; lrogerio@ufba.br; fraga.pereira@ufba.br;
fernandolaureano@pucminas.br; sergiomn@ufba.br; mrzucchi@ufba.br; ndbarbosa@ufba.br

Recebido em: 20/09/2018 Aprovado em: 12/04/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_117_125

Resumo

A água subterrânea, em regiões áridas e semiáridas é, em muitos casos, a única fonte disponível de abastecimento hídrico para a população. O declínio ou deterioração em sua qualidade é considerado um problema crucial para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Nesse trabalho, é realizado uma investigação hidrogeológica utilizando dados geoquímicos e isotópicos no aquífero cárstico, instalado nas rochas carbonáticas proterozoicas da Formação Salitre: porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Com isso, pretende-se compreender os processos hidrogeoquímicos e físicos que contribuem para a salinização da água subterrânea. Esse entendimento é essencial na exploração sustentável dos recursos hídricos. Nesse contexto, os principais resultados obtidos indicam que os processos de evaporação e lixiviação se evidenciaram pouco eficientes na reconcentração de sais minerais na zona vadosa do aquífero. As modelagens hidrogeoquímica e isotópica demonstraram que a salinidade da água subterrânea, está sujeita a processos geológicos, decorrentes da interação água rocha. O uso integrado da geoquímica e de isotópicos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), em aquíferos cársticos, corresponde a um importante instrumento na modelagem e entendimento dos processos de salinização da água subterrânea e uma ferramenta eficaz na avaliação e gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: salinização da água subterrânea; aquífero carbonático; NE Brasileiro

Abstract

Groundwater in arid and semi-arid regions is frequently the only available source of water for the population. Quality decline or deterioration is considered a crucial problem for the management of groundwater resources. In this study, a hydrogeological investigation was carried out using geochemical and isotopic data in a karst aquifer, installed in the Proterozoic carbonate rocks of the Salitre Formation: southern portion of the Irecê Basin, Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. The aim was to understand the hydrogeochemical and physical processes that contribute to the salinization of groundwater. This understanding is essential for the sustainable exploitation of water resources. The main results indicated that the processes of evaporation and leaching were not very efficient in the reconcentration of mineral salts in the vadose zone of the aquifer. Hydrogeochemical and isotopic modeling showed that the salinity of the groundwater is subjected to geological processes, resulting from rock-water interaction. The integrated use of geochemistry and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) in karst aquifers is an important instrument in the modeling and understanding of groundwater salinization processes and an effective tool in the evaluation and management of water resources.

Keywords: groundwater salinization; karst aquifer; northeastern Brazil

1 Introdução

A salinização das águas subterrâneas tornou-se um dos principais problemas na gestão e utilização dos recursos hídricos subterrâneos no mundo (UNESCO, 2004). Sua composição química está sujeita a diversas transformações, induzidas por processos hidrológicos, geoquímicos e biológicos. Tais processos são, por sua vez, dependentes da composição mineralógica da rocha, do tempo de residência da água, do fluxo subterrâneo e de condições climáticas (Falcone *et al.*, 2008; Sánchez *et al.*, 2015).

Na maioria dos países, a água subterrânea é utilizada para o abastecimento doméstico de pequenas cidades, principalmente em regiões rurais. Nessas locais, a deterioração na qualidade da água pode acarretar em consequências negativas na atividade civil, agrícola e industrial. Dessa forma, a compreensão da origem e dos mecanismos dos processos de salinização se torna uma prática fundamental para a prevenção e manejo dos recursos hídricos subterrâneos (Ghiglieri *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015). Dentre os diferentes tipos de abordagens, a integração dos métodos hidroquímicos e isotópicos consistem em um importante mecanismo na identificação das possíveis fontes de salinização e renovação das águas subterrâneas. (Shiavo *et al.*, 2013; Carreira *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2014; Alvarez *et al.*, 2015).

A porção meridional da Bacia de Irecê é cenário de importantes descobertas científicas, principalmente aquelas relacionadas às caracterizações hidrogeológicas de caráter regional (Guerra, 1986; Valle, 2004). Entretanto, a compreensão da hidrogeologia local e dos processos de salinização atuantes consistem em uma importante lacuna do conhecimento atual, dificultando a gestão eficaz dos recursos hídricos na região (Ettayfi *et al.*, 2012; Ghiglieri *et al.*, 2012; Murad *et al.*, 2011).

O presente trabalho discute a avaliação de múltiplas ferramentas hidroquímicas e isotópicas, visando uma melhor compreensão dos processos hidrogeoquímicos e físicos que contribuem para a salinização da água subterrânea. Esse entendimento é essencial na exploração sustentável do recurso hídrico em regiões áridas e semiáridas, onde esse recurso é bastante limitado.

1.1 Descrição da Área

A área de estudo está localizada na porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (Figura 1A). Sua geologia é formada por uma espessa sequência carbonática-pelítica de idade neoproterozoica, correspondente à Formação Salitre, disposta de maneira discordante sobre unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas, predominantemente, siliciclásticas que compõem o Grupo Chapada Diamantina. Entre estas unidades ocorre uma camada descontínua de diamictitos glaciais da Formação Bebedouro, que é sotoposta à Formação Salitre e juntas integram o Grupo Una. São mapeadas coberturas detrito-lateríticas cenozoicas sobre as rochas proterozoicas da região (Figura 1B) (Misi 1979; Bonfim *et al.*, 1985; Souza *et al.*, 2002; Pedreira, 2004).

A região está inserida no contexto de clima semiárido, com uma série histórica de chuva média anual, para os últimos 30 anos (de 1965 – 1995), da ordem de 678 mm (SRH, 1995). A temperatura média anual é de 22,81°C, com umidade relativa em torno de 53,06% (INMET, 2015), para valores obtidos entre o período de 1988 a 2015. O contorno das linhas equipotenciais e as principais direções do fluxo subterrâneo estão representados na Figura 1A. A superfície potenciométrica indica uma direção preferencial do fluxo em direção a calha do rio Santo Antônio, principal exutório subterrâneo (Salles *et al.*, 2017A).

A porção meridional da Bacia de Irecê é constituída por rampas suavemente inclinadas e onduladas, com declividades variando entre 0 e 12%. Topograficamente, essa área apresenta altitudes variando entre 880 a 640 metros, onde se observa diminuição na altitude da porção Norte para Sul (rio Sto. Antônio) (Salles *et al.* 2018B). As formas de relevo cárstico encontradas consistem basicamente à depressões cársticas na forma de dolinas e uvalas, com orientação preferencial NW – SE e, subordinadamente, N – S, ocupando 3,64% da área total e concordante com o fluxo da água subterrânea regional apresentado na Figura 1B. Estas geoformas são responsáveis também pela rápida infiltração da água autigênea no solo.

Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro

Lucas de Queiroz Salles; Luiz Rogério Bastos Leal; Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira; Fernando Verassani Laureano; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Maria do Rosário Zucchi & Natanael da Silva Barbosa

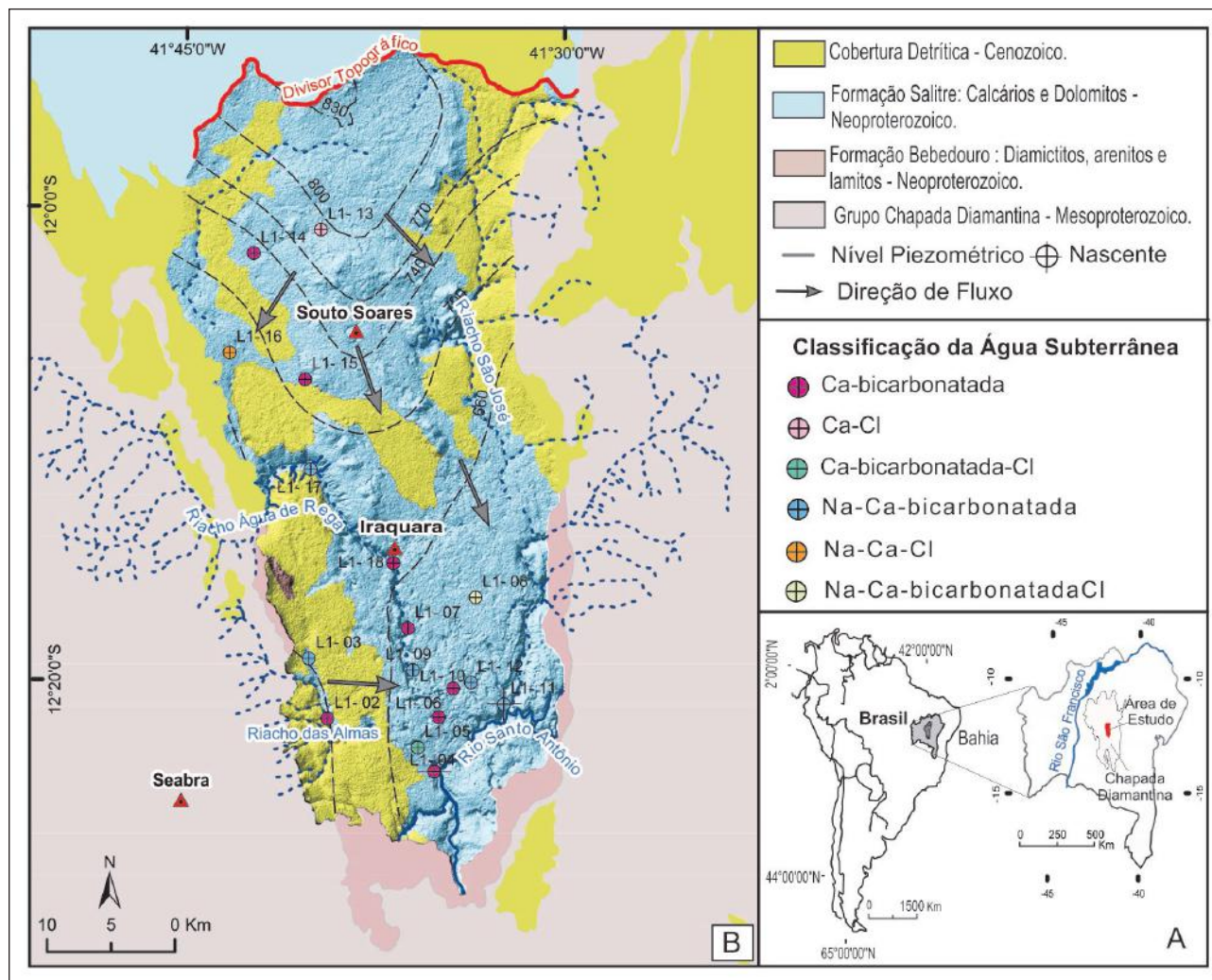


Figura 1 (A) Localização da área de estudo; (B) mapa geológico simplificado (IBGE/SEL, 2013), com os pontos de análise e a classificação da água subterrânea para as amostras coletadas no aquífero carbonático. A superfície piezométrica e, por conseguinte o fluxo subterrâneo, foram reconstituídos a partir de 83 poços tubulares que constam na base de dados da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia – CERB.

2 Materiais e Métodos

Para a análise e compreensão dos processos de salinização da água subterrânea vigentes na área de estudo foram utilizados cinco conjuntos de dados. Estes incluem análises químicas e isotópicas, fichas descritivas de poços tubulares da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia – CERB, mapeamento da superfície potenciométrica e observações de campo. Para esse estudo, foram coletadas 20 amostras de água subterrânea em uma campanha de campo realizada em Julho de 2015 em poços tubulares, cacimbas e afloramento do nível d'água em

cavernas. Desse total, 18 amostras foram coletadas do aquífero cárstico e 2 amostras foram coletadas no aquífero fraturado, representado pelo Grupo Chapada Diamantina. Os métodos utilizados nesse estudo serão descritos sequencialmente, seguindo a abordagem de integrações dos dados.

2.1 Análises Químicas e Isotópicas

As alíquotas destinadas às análises químicas foram filtradas em conjunto Millipore, utilizando filtros de $0,45\mu\text{m}$ e os frascos fechados foram con-

servados sob refrigeração para posterior encaminhamento ao laboratório. As análises químicas foram efetuadas no Laboratório de Estudos Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, segundo os métodos preconizados por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Clesceri *et al.*, 1998). A determinação dos cátions (i.e., Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) e os ânions (F^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- e SO_4^{2-}) foi realizada através de cromatografia iônica (CI), enquanto a alcalinidade (HCO_3^- e CO_3^{2-}) foi obtida por titulação.

As análises dos isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA-CPGG/IF-UFBA). Para a sua realização, foi utilizado um sistema composto de um espectrômetro de massa de razão isotópica *MS Finnigan MAT Delta Plus* e um reator automático *H-Device Thermo Quest Finnigan*. Os valores $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ são representados na notação delta, em partes por mil, e foram normalizados segundo o padrão internacional *Viena Standard Mean Ocean Water (VSMOW)* da *International Atomic Energy Agency (IAEA)*.

3 Resultados e Discussões

Os parâmetros hidroquímicos medidos e calculados estão representados no Tabela 1. Com o intuito de ilustrar a dispersão das amostras analisadas foi realizada uma abordagem analítica utilizando o diagrama de Piper (1944) (Figura 2), evidenciando o conteúdo de cátions e ânions das amostras. Nela, 48% das amostras coletadas no aquífero cárstico foram classificadas como $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$; 28% como $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, e os outros 24% das amostras foram classificadas igualmente como: $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-Cl}^-$ (6%), $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-Cl}^-$ (6%), $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ (6%) e $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-Cl}^-$. Já as águas subterrâneas da aquífero fissural Chapada Diamantina foram classificadas como $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ e $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-K}^+\text{-Cl}^-$. No que diz respeito às águas subterrâneas do aquífero cárstico Salitre é observado, no domínio dos ânions, uma evolução hidroquímica de águas de cloretadas para bicarbonatadas. Já na competência dos cátions foi notada uma evolução de águas sódica-potássica para cálcica.

Segundo a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde, que dispõe normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de

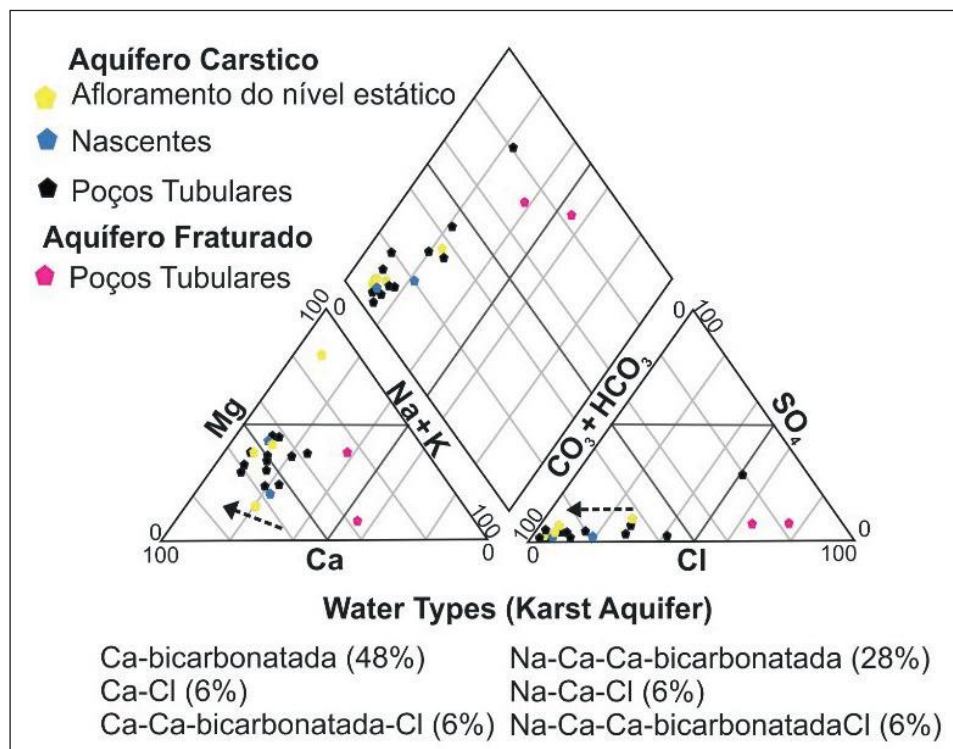


Figura 2 Diagrama triangular de Piper (1944) para as águas subterrâneas coletadas na porção meridional da Bacia de Irecê. As setas em preto demonstram uma evolução geoquímica teórica para água subterrânea.

Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro

Lucas de Queiroz Salles; Luiz Rogério Bastos Leal; Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira;

Fernando Verassani Laureano; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Maria do Rosário Zucchi & Natanael da Silva Barbosa

Amostra	Natureza	Aquífero	Alc (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	Is _{Cal}	Is _{Dol}	pCO ₂ (Pa)
L1-01	Surgência	Cárstico	83,5	6,6	1,9	1,4	2,9	12,3	0,6	3	-5,71	-29,56	-0,01	-0,48	0,49
L1-02	Poço Tubular	Cárstico	214	21,5	17,6	6,7	34,1	14,4	9,7	1,2	-5,73	-35,32	0,22	0,12	0,28
L1-03	Poço Tubular	Cárstico	223,3	6,2	4,6	0,7	14	9,2	3,5	2	-5,57	-30,49	1,2	2,44	1,60
L1-04	Nascente	Cárstico	127	35,1	4,6	45,5	38,7	5,3	13,5	1,5	-5,22	-28,70	0,26	-0,19	0,20
L1-05	Surgência	Cárstico	121	58,9	28,7	20,4	48,4	10,3	21	1,2	-5,48	-34,02	0,29	0,05	0,15
L1-06	Poço Tubular	Cárstico	104	50,2	9	14,2	33,2	8,6	11,8	1,1	-4,86	-29,63	0,22	0,04	0,34
L1-07	Poço Tubular	Cárstico	234	6,6	22,1	0,5	31,6	10,9	3,6	1,9	-6,14	-33,76	1,1	1,82	0,39
L1-08	Poço Tubular	Cárstico	237	119,6	41,8	122,1	59,9	38,4	45,4	0,8	-5,45	-29,85	0,25	0,38	0,20
L1-09	Surgência	Cárstico	168,6	12	17,9	0,3	22,6	12,4	5,7	1,8	-4,32	-25,17	1,1	2,1	0,61
L1-10	Poço Tubular	Cárstico	149	23,5	5,2	6	24,6	8,8	7,5	1,4	-5,83	-32,37	0,15	-0,02	0,19
L1-11	Nascente	Cárstico	167	12,6	5	2	19,6	11,1	3,9	2,1	-5,73	-32,88	0,09	0,04	0,19
L1-12	Poço Tubular	Cárstico	179	14	3,9	3,9	20,2	9,2	4,8	2,1	-4,91	-29,11	1,01	1,84	0,54
L1-13	Poço Tubular	Cárstico	154	261	202	13,7	131,8	38,4	64	2,9	-5,42	-32,02	0,79	1,3	0,35
L1-14	Poço Tubular	Cárstico	212,1	44,9	19,6	5,9	49,9	21,6	6,4	1,7	-8,55	-55,20	1,24	2,25	0,28
L1-15	Poço Tubular	Cárstico	180	23,4	13,7	10,6	45,4	13,7	6,4	0,9	-8,19	-49,31	0,29	0,17	0,11
L1-16	Poço Tubular	Cárstico	233	203	19,9	10,9	67,2	35,9	36,5	1	-5,97	-34,99	0,3	0,42	0,23
L1-17	Poço Tubular	Cárstico	132	7,6	2	2,4	16,9	10,8	2,7	3	-5,57	-31,23	0,05	0,03	0,22
L1-18	Surgência	Cárstico	167	12	10,3	2,2	26,4	11,4	3,5	2	-5,70	-31,64	0,17	0,09	0,16
L1-19	Poço Tubular	Fraturado	2,60	3,30	0,60	1,20	0,80	0,80	1,20	0,40	-5,48	-29,70	-	-	-
L1-20	Poço Tubular	Fraturado	*	2,50	0,40	0,70	0,60	*	1,00	*	-5,77	-31,53	-	-	-

Tabela 1 Parâmetros químicos e isotópicos da área de estudo, coletados em julho de 2015. O limite de detecção (Ld) para a alcalinidade é de 2 mg/L, já para os íons é 0,25 mg/L. * correspondem a valores abaixo do Ld; - consiste em parâmetros não calculados. A seguir estão mostrados o enquadramento do Ministério da Saúde ((Portaria de Consolidação nº 05 de 28/09/2017)) de águas para o consumo humano: Nitrato (como N) - 10 mg/L; Cloreto - 250 mg/L

Saúde, as águas mostradas no Apêndice 1, encontram-se dentro dos padrões de potabilidade para o consumo humano. Entretanto, seu uso apresenta uma série de problemas, principalmente aqueles relacionados a comatação de filtros e poços por carbonatos de cálcio e magnésio, dificultando o tratamento da água e a manutenção dos poços de abastecimento.

Uma Análise de Componente Principal (ACP) permitiu uma abordagem de interdependência entre as variáveis químicas e isotópicas analisadas (Figura 3). A primeira componente principal explica 83,13% da variância e mostra uma forte correlação entre os dados isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), e entre os índices de saturação em calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e rHCO_3^- . Já a segunda componente principal abrange 12,66% da variância, e demonstra uma forte correlação entre o cálcio, cloreto, sulfato, magnésio, em miliequivalente, e os índices de saturação em anidrita (CaSO_4) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Figura 3A).

A partir da Figura 3B foi possível individualizar três grupos para as águas analisadas. O primeiro grupo é tido como de água naturais, sem vestígios de

deterioração antrópica da sua qualidade. Nesse grupo observam-se baixos teores de cloreto e nitrato e uma tendência de evolução das águas para bicarbonatada. O segundo grupo remete a um sistema cárstico independente, marcado por assinaturas isotópicas distintas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) (Clark e Fritz, 1997). Por fim, o grupo 3 refere-se a águas contaminadas por atividades antrópicas, como despejo de lixo, esgoto ou a atividade agropastoril, evidenciado pelos elevados teores de nitrato e cloreto dissolvidos na água.

3.1 Isótopos Estáveis na Água

As amostras de água subterrâneas apresentaram valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ variando de -8,55‰ a -4,32‰ e -55,2‰ a -25,17‰, respectivamente. A linha meteórica local (LMWL – linha em vermelho), elaborado a partir das amostras coletadas, é definida através da seguinte regressão linear: $\delta^2\text{H} = 4,69 \cdot \delta^{18}\text{O} - 5,58\%$. A LMWL é paralela, mas ligeiramente mais positiva que a reta meteórica global (GMWL – linha azul) (Figura 4), representada pela regressão linear: $\delta^2\text{H} = 8,13 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\%$ (Rozanski

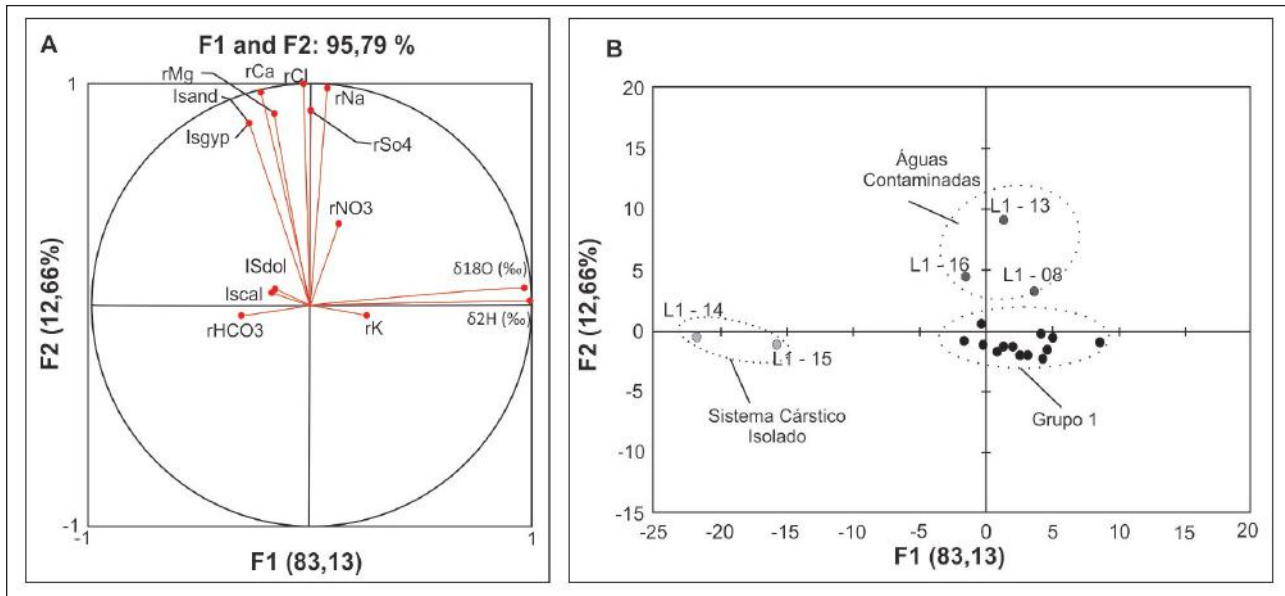


Figura 3 (A) Análise de componentes principais (ACP) para os dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as amostras coletadas no aquífero cárstico e no aquífero fraturado. As componentes principais F1 e F2 explicam 100% da variância amostral; (B) Análise de componentes principais (ACP) para os parâmetros físicos e isotópicos das águas do aquífero cárstico analisadas. As componentes principais F1 e F2 explicam 95,79% da variância amostral.

et al., 1993), sugerindo uma rápida infiltração para água subterrânea com uma pequena taxa de evaporação na zona vadosa.

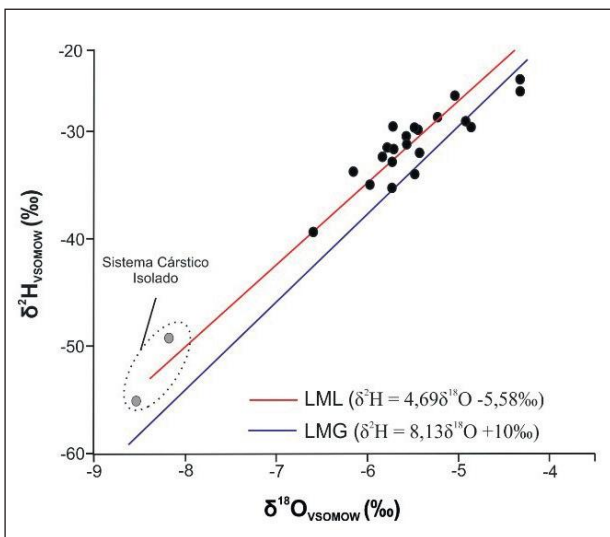


Figura 4 Linha meteórica local (LML), elaborada a partir da relação isotópica medida nas águas analisadas, em comparação com a reta meteórica global (LMG) (Rozanski et al., 1993). Os dados do denominado sistema cárstico isolado não foram utilizados nessa regressão.

O processo de evaporação é um fenômeno que pode aumentar a concentração de íons na água

subterrânea em regiões áridas e semiáridas. A Figura 5 demonstra uma correlação entre O^{18} e o íon sódio (Figura 5A), e O^{18} em relação ao cloreto (Figura 5B). Nela, é demonstrado que não houve um enriquecimento significativo nos teores de Cl^- e Na^+ com o fracionamento isotópico ($\delta^{18}\text{O}$), excluindo a possibilidade da influência da evaporação, na zona não saturada do aquífero, no processo de salinização da água subterrânea. Portanto, um mecanismo adicional é necessário para explicar a evolução desse processo. Fato similar foi observado por Santos (2008) para essa mesma unidade litoestratigráfica na Bacia Hidrográfica do rio Salitre.

3.2 Modelagem Geoquímica

A partir da análise petrográfica sistemática realizada por Salles (2017), foi possível afirmar que a Calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) são os principais componentes formadores da rocha carbonática em estudo. Esses minerais são dissolvidos em uma solução aquosa, provocando um desequilíbrio no sistema. Essa instabilidade libera os íons de Ca^{2+} e Mg^{2+} na água. A Figura 6 demonstra corre-

Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro

Lucas de Queiroz Salles; Luiz Rogério Bastos Leal; Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira;

Fernando Verassani Laureano; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Maria do Rosário Zucchi & Natanael da Silva Barbosa

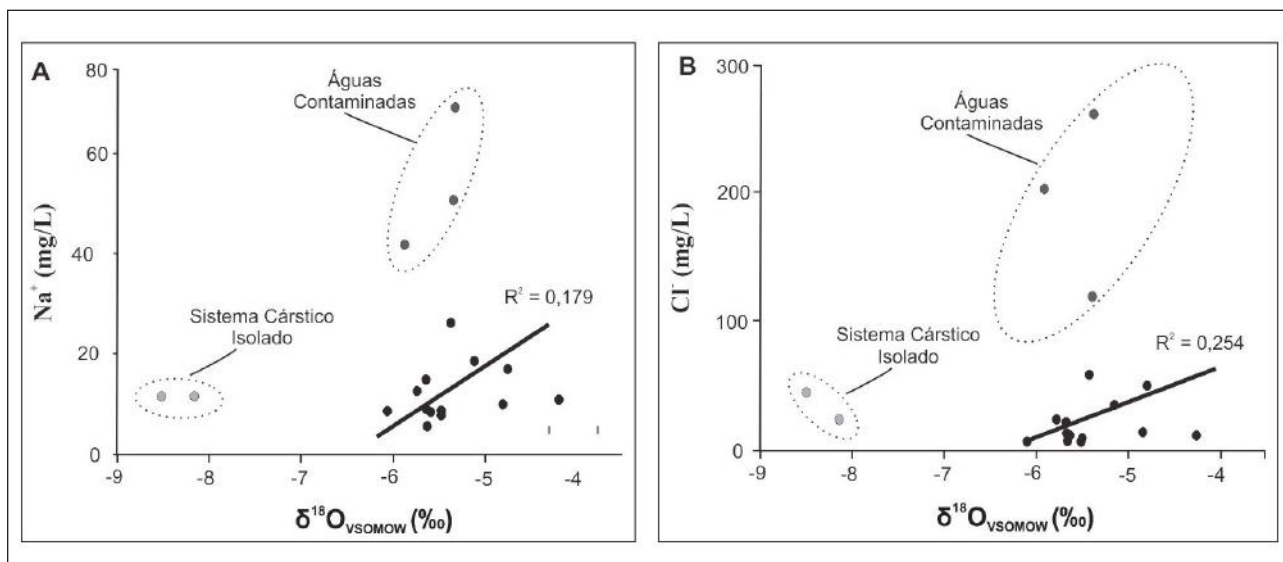


Figura 5 Correlações em (A) entre $\delta^{18}\text{O}$ e Na^+ (mg/L); e (B) entre $\delta^{18}\text{O}$ e Cl^- (mg/L). Na elaboração da regressão linear (a1 e a2) não foram utilizados os dados do sistema isolado, bem como as águas contaminadas.

lações entre Cl^- , Na^+ , SO_4^- e K^+ , em função $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^+$ (em milequivalente). A alta correlação existente (Figura 6 A, B e C) demonstrou que a medida que a dissolução da rocha aumenta ocorre um aumento nos teores e Cl^- , Na^+ e SO_4^- na água subterrânea, indicando que a presença desses elementos na água ocorre em reposta de um mesmo processo de salinização, associado à dissolução da rocha carbonática. Assim como observado por Falcone *et al.* (2008) em rochas carbonáticas na porção central da Itália.

Já para o rK (Figura 6 D) é verificado uma relação inversa, sugerindo que o teor K diminui com a percolação da água no meio aquífero, possivelmente associado a adsorção pelas argilas ou matéria orgânica.

4 Conclusão

O aquífero carbonático em questão é de natureza livre e apresenta superfície piezométrica acompanhando a topografia local, com fluxo subterrâneo preferencial em direção a calha do rio Santo Antônio. Em geral, ocorre uma evolução hidrogeoquímica das águas de cloretada sódica-cálcica para águas de composição bicarbonatada cálcica.

A partir da técnica de agrupamento, denominada análise de componentes principais (ACP), é possível individualizar três grupos para as águas analisadas. O primeiro corresponde as águas naturais, sem degradação de sua qualidade por atividades antrópicas. Já o segundo, remete a águas naturais de um sistema cárstico isolado, com assinatura isotópica distinta ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), sugerindo um momento de recarga diferente para essas águas. Por fim, o terceiro grupo é relacionado a águas contaminadas por atividades antrópicas recentes, como despejo de lixo e esgoto.

O estudo isotópico demonstra que não há enriquecimento nos teores de Na e Cl, na zona vadosa do aquífero, pelo processo de evaporação. Isso ocorre pela rápida infiltração da água no solo. Por fim, o modelamento geoquímico das águas sugere que as presenças de cloreto, sódio e sulfato, podem ser atribuídas ao mesmo processo de salinização, associado a dissolução da rocha carbonática.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa.

Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro

Lucas de Queiroz Salles; Luiz Rogério Bastos Leal; Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira;

Fernando Verassani Laureano; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Maria do Rosário Zucchi & Natanael da Silva Barbosa

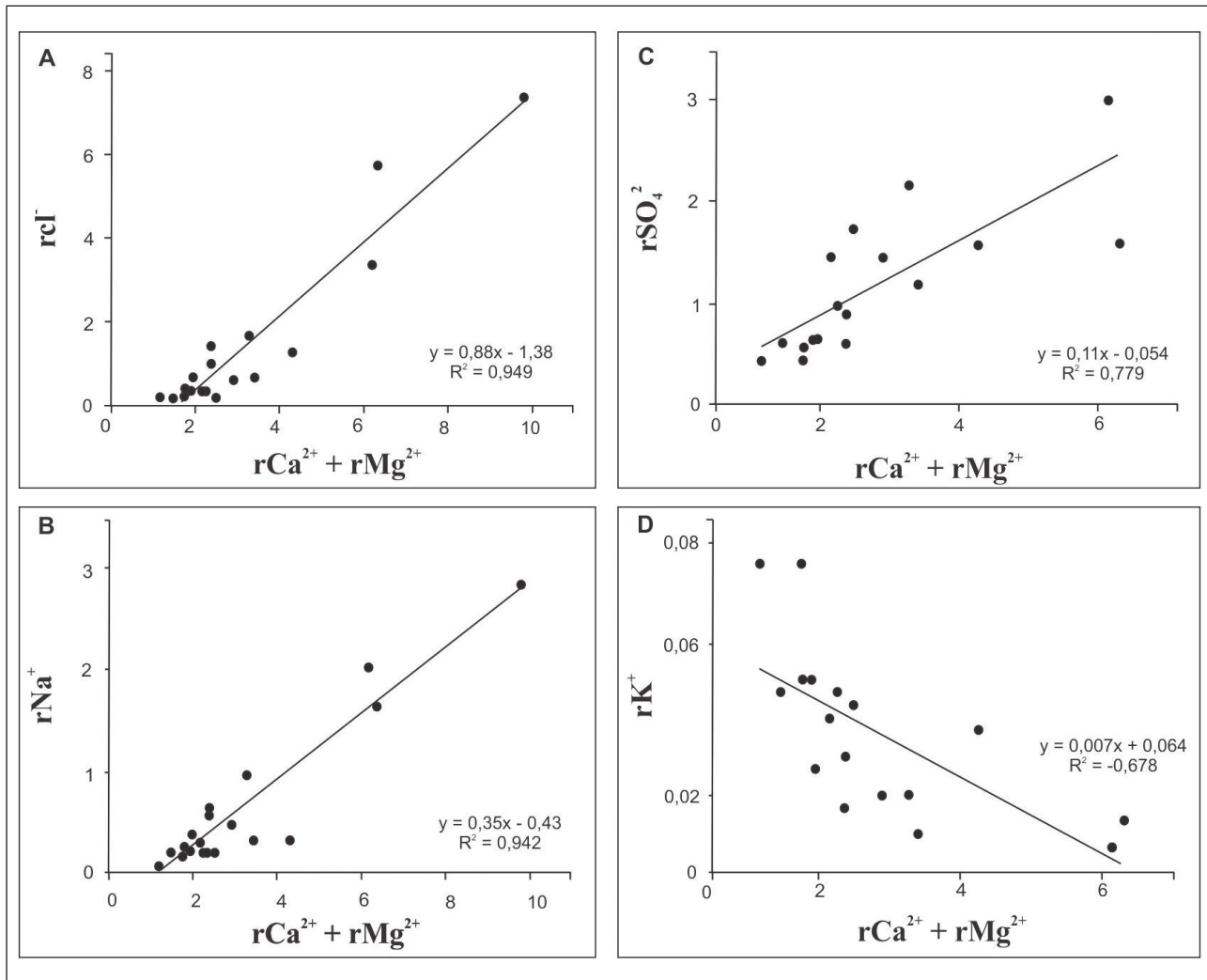


Figura 6 Modelagem geoquímica para as amostras analisadas. (A) rCl - vs rCa 2+ + rMg 2+ ; (B) rNa + vs rCa 2+ + rMg 2+ ; (C) rSO 4 2- vs rCa 2+ + rMg 2+ ; e (D) rK + vs rCa 2+ + rMg 2+

6 Referências

- Alvarez, M. P.; Dapena, C.; Bouza, P. J.; Rios, I. & Hernandez, M. A. 2015. Groundwater salinization in arid coastal wetlands: a study case from Playa Fracasso, Patagonia, Argentina. *Environ Earth Sci*, 73: 7983–7994.
- Bomfim L. F. C.; Rocha A. J. D.; Pedreira A. J.; Moraes Filho J. C.; Guimarães J. T. & Tesch N. A. 1985. *Projeto Bacia de Irecê. Relatório Final*. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM.
- Carreira, P. M.; Marques, J. M. & Nunes, D. 2014. 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.
- Clark, I & Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrology*. New York, Lewis Press, vol. II, 312 p.
- Clesceri, L. S.; Greenberg, A. E. & EATON, A. D. 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, 20th ed. American Public Health Association, 1325 p.
- Falcone, A. F.; Falgiani, A.; Parisse B.; Petitta M.; Spzico M. & Tallini M. 2008. Chemical and isotopic ($d^{18}\text{O}\%$, $d^2\text{H}\%$, $d^{13}\text{C}\%$, ^{222}Rn) multi-tracing for groundwater conceptual model of carbonate aquifer (Gran Sasso INFN underground laboratory – central Italy). *Journal of Hydrology*, 357: 368–388.
- Ettayfi, N.; Bouchaou, L.; Michelot, J. L.; Togma, T.; Warner, N.; Boutaleb, S.; Massault, M.; Lgourna, Z. & Vengosh. 2012. Geochemical and isotopic (oxygen, hydrogen, carbon, strontium) constraints for the origin, salinity, and residence time of groundwater from a carbonate aquifer in the Western Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Journal of Hydrology*, 438–439: 97–111.
- Ghiglieri, G.; Carletti, A. & Pittalis, D. 2012. Analysis of salinization processes in the coastal carbonate aquifer of

Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicadas no Entendimento dos Processos de Salinização da Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidência do Semiárido do Nordeste Brasileiro

Lucas de Queiroz Salles; Luiz Rogério Bastos Leal; Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira;

Fernando Verassani Laureano; Sérgio Augusto de Moraes Nascimento; Maria do Rosário Zucchi & Natanael da Silva Barbosa

- Porto Torres (NW Sardinia, Italy). *Journal of Hydrology*, 432: 43-51.
- Guerra A. M. 1986. *Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Bahia*. Programa de Geologia de Aplicação – Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 148 p.
- Han, D.M.; Song, X.F.; Currell, M. J.; Yang, J.L. & Xiao, G.Q. 2014. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China. *Journal of Hydrology*, 508: 12–27.
- IBGE/SEI – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2013. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 23 de dez. 2015.
- Misi, A. 1979. *Grupo Bambuí no Estado da Bahia. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1: 119-154.
- Murad, A. A.; Garamoon, H; Hussein, S. & Nuaimi, H. S. 2011. Hydrogeochemical characterization and isotope investigations of a carbonate aquifer of the northern part of United Arab Emirates. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 213-225.
- Pedreira A.J. 2004. *O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 186 p.
- Portaria de Consolidação nº5 do Ministério da Saúde, publicada em 22/09/2017.
- Rozanski, K.; Araguas, L. & Gonfiantini, R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *AGU Geophys. Monogr*, 78: 1-37.
- Santos C. P. L 2008. *Análise dos Processos de Salinização das Águas Subterrâneas da Bacia do Rio Salitre por Meio de Traçadores Ambientais*. Programa de Pós Graduação em Física, Universidade Federal da Bahia, Tese de Doutorado, 273 p.
- Salles, L. Q. (2017) *Hidrogeologia e Risco Geológico em Rochas Carbonáticas Proterozoicas: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado, p. 123.
- Salles, L. Q.; Bastos Leal, L. R.; Pereira, R. G. F. de A.; Laureano, F. V. & Gonçalves, T. dos S. (2018). Influência dos Aspectos Hidrogeológicos de Aquíferos Cársticos na Evolução do Relevo: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, p. 94-106.
- Sánchez, D.; Barberá, J. A.; Mudarra, M. & Andreo, B. 2015. Hydrogeochemical tools applied to the study of carbonate aquifers: examples from some karst systems of Southern Spain. *Environ Earth Sci* 74: 199-2015.
- Schiavo, M.A.; Hauser, S. & Povinec, P.P. 2009. Stable isotopes of water as a tool to study groundwater–seawater interactions in coastal south-eastern Sicily. *Journal of Hydrology*, 364: 40– 49.
- Souza S.L.; Toledo L.A.A.; Brito P.C.R.; Frões R.J.B. & Silva R.W.S. 2002. *Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia*. Salvador, CBPM. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, v. 1, 164 p.
- SRH. 1995. *Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacias dos Rios Verde e Jacaré*. Margem Direita do Lago de So-bradinho, 119 p.
- UNESCO. 2004. *Groundwater resources of the world and their use*. IHP-VI, Series on Groundwater N°. 6, 342 p.
- Valle, M. A. *Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias De Irecê E Salitre): um Exemplo da Ação de Ácido Sulfúrico no Sistema Cárstico*. 2004. Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, p. 373.
- Zhang, W.; Chen, Xi; Tan, H.; Zhang & Y. Cao, J.2015. Geochemical and isotopic data for restricting seawater intrusion and groundwater circulation in a series of typical volcanic islands in the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 93: 153-162.