



Modelagem da Interação Água/Rocha nos Aquíferos Fraturados da Região de Itabuna/BA
Modeling Rock-Water Interaction of Fractured Aquifer in Itabuna/BA Region

Elias Hideo Teramoto^{1,2}; Roger Dias Gonçalves^{1,2};
Marcia Regina Stradioto^{1,2}; Bruno Zanon Engelbrecht^{1,2} & Hung Kiang Chang^{1,2,3}

¹ Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC)

Av. 24A, 1515, CEP: 13506-900, Bela Vista, Rio Claro, SP, Brasil

² Centro de Estudos Ambientais (CEA), UNESP – Campus de Rio Claro/SP

Av. 24A, 1515, CEP: 13506-900, Bela Vista, Rio Claro, , Rio Claro, SP, Brasil

³ Departamento de Geologia Aplicada (DGA), UNESP – Campus de Rio Claro/SP

Av. 24A, 1515, CEP: 13506-900, Bela Vista, Rio Claro, , Rio Claro, SP, Brasil

E-mails: teramoto@rc.unesp.br; stradioto@rc.unesp.br; rogerdias@rc.unesp.br; bruno@rc.unesp.br; chang@rc.unesp.br

Recebido em: 18/10/2018 Aprovado em: 27/02/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_735_741

Resumo

Este trabalho objetivou investigar os mecanismos geoquímicos que governam as fortes variações hidroquímicas nos aquíferos fissurais da região de Itabuna/BA. Enquanto a mineralogia original metatonalítica/metatrandhjemítica é composta principalmente por plagioclásio e quartzo, as rochas metabásicas são representadas por plagioclásios, piroxênios e anfibólios. Os principais minerais gerados pela interação rocha/água são a zeólitas, cloritas e montmorilonitas. Conceitualmente, dois processos distintos atuam nas varrições hidroquímicas do aquífero. O primeiro é representado pela interação da água meteórica com os aerossóis marinhos, enquanto o segundo é representado pela atuação da evapotranspiração que incrementa a salinidade da água e o terceiro é representado pela interação com as rochas metatonalíticas/metatrandhjemíticas e metabásicas. As simulações geoquímicas foram capazes de reproduzir as variações composicionais observadas em campo. Enquanto o incremento de Cl⁻ pode ser atribuído à interação da água meteórica precipitada com aerossóis marinhos e posterior evaporação, o incremento de Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻ é atribuído ao intemperismo de plagioclásios, piroxênios e anfibólios.

Palavras-chave: Aquífero fissural; Interação rocha/fluido; Intemperismo de silicatos

Abstract

This research aimed to investigate the geochemical mechanisms that govern the strong hydrochemical variations in the fractured aquifers of the Itabuna/BA region. Plagioclase and quartz comprise the major mineralogy of metatonalite/metatrandhjemite rocks, while plagioclase, pyroxenes and amphiboles comprise the major mineralogy of metabasic rocks. Zeolites, chlorites and montmorillonites comprise the main mineral phases generated by rock/water interaction. Conceptually, three distinct processes act on the hydrochemical variations of the aquifer. The first one is represented by the interaction of meteoric water with marine aerosols, while the second one is governed by high evapotranspiration rates that increase the water salinity, and the third one is represented by the interaction with metatonalite/metatrandhjemite and methasic rocks. The geochemical simulations were able to reproduce the compositional variations observed in the field. The increase of Cl⁻ can be attributed to the interaction of precipitated meteoric water with marine aerosols and subsequent evaporation, whereas the increase of Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ and HCO₃⁻ is due to the weathering of plagioclase, pyroxenes and amphiboles.

Keywords: Fractured aquifer; Rock/fluid interaction; Silicate weathering

1 Introdução

Os aquíferos cristalinos fraturados representam uma importante fonte de abastecimento de água devido à sua ampla área de ocorrência. Em consequência da complexidade relacionada à circulação e armazenamento de água nas descontinuidades de aquíferos cristalinos, a capacidade de prever a produtividade desses aquíferos permanece severamente limitada (Berkowitz, 2002). A qualidade da água subterrânea armazenada nas descontinuidades da rocha pode ser altamente variável em razão da composição mineralógica e grau de interação química da água com os minerais que compõem a rocha. A interação água-rocha nas fraturas é um fenômeno complexo, uma vez que envolve um grande conjunto de reações com a incongruente dissolução de minerais silicatados e a precipitação de minerais secundários (Pauwels *et al.*, 2015; Hasegawa *et al.*, 2016; Wanner *et al.*, 2017).

A região de Itabuna/BA está sujeita a estresse hídrico devido à baixa abundância de águas tanto superficiais como sub-superficiais, intensificada pela seca severa nos últimos três anos. O aquífero fissural na região de Itabuna permanece pouco entendido de-

vido à incipiência de trabalhos desenvolvidos anteriormente nesta região. O trabalho de caracterização hidroquímica apresentada por Teramoto *et al.* (2018) apontou para fortes variações na composição química da água armazenada nas descontinuidades geológicas do aquífero cristalino no município de Itabuna/BA. Para subsidiar a identificação dos mecanismos que governam as variações hidroquímicas na região de Itabuna, o presente trabalho teve como objetivo promover uma caracterização mineralógica do aquífero e realizar simulações geoquímicas.

O município de Itabuna, no estado da Bahia, região nordeste do Brasil, está localizado a cerca de 28 km do Oceano Atlântico e compreende a região costeira denominada Mata (Figura 1). Geologicamente o município está localizado no domínio Itabuna-Salvador-Curaçá, composto pelo cinturão de Itabuna, ao sul, e Salvador-Curaçá, ao norte (Pinho, 2005). Estas unidades são formadas por granulitos tonalíticos e trondhjêmíticos, subdivididas em séries toleíticas, cálcio-alcalinas de baixo potássio e shoshoníticas, associadas a bandas metassedimentares e basaltos e gabro-oceânicos e/ou bacias back-arc (Barbosa & Sabaté, 2002).

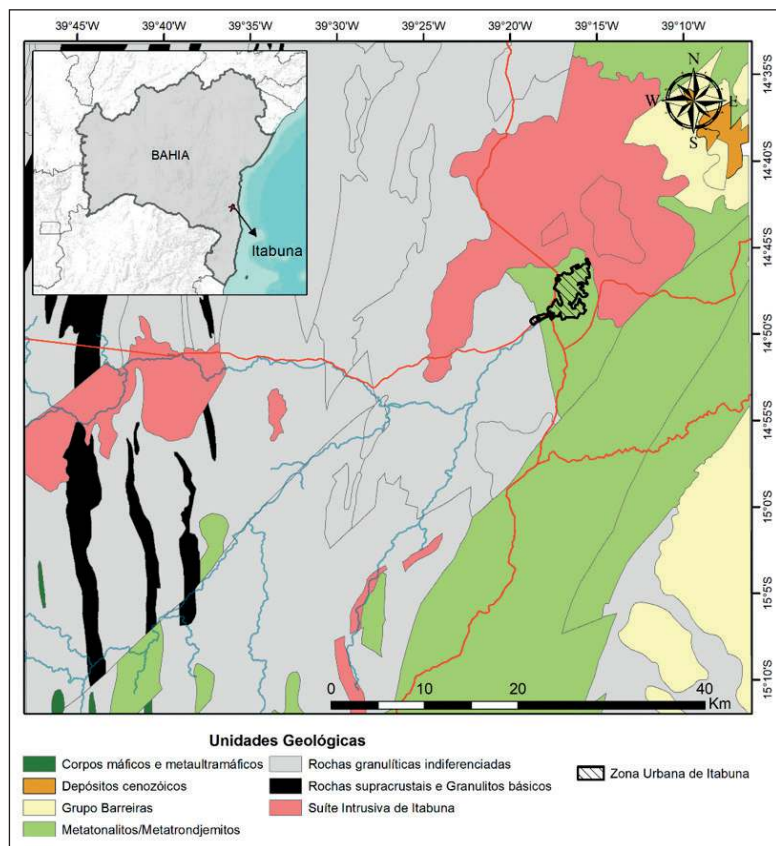


Figura 1 Mapa geológico do Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá (Pinho, 2005).

2 Materiais e Métodos

2.1 Identificação Mineralógica do Aquífero

O reconhecimento geológico permitiu a identificação de granulitos tonalíticos e trondhjemiticos previamente descritos por Pinho *et al.* (2011). Embora sejam observados enclaves isolados e menos abundantes de rochas metabásicas, originários do metamorfismo de rochas basálticas de fundo oceânico, descritas por Barbosa & Sabaté (2002). Por intermédio da técnica do aparelho de Microscopia Eletrônica de Varredura JEOL foi possível identificar a paragênese mineralógica de metatonalitos/metatrandhjemitos e rochas metabásicas, que compõem os litotipos predominantes na área de estudo.

2.2 Simulação Geoquímica

A partir da caracterização hidroquímica apresentada por Teramoto *et al.* (2018), das investigações mineralógicas deste trabalho e de trabalho prévios, foi elaborado um modelo geoquímico conceitual para explicar as variações composicionais das águas subterrâneas na área de interesse. Para avaliar a viabilidade do modelo conceitual concebido, simulações geoquímicas foram realizadas empregando o aplicativo *React*, que compõe o *Geochemist's Workbench* (Bethke & Yeakel, 2016). A massa dos minerais que reagiram com a água foi obtida por ajustes consecutivos nos modelos numéricos empregados.

3 Resultados

3.1 Caracterização Mineralógica

Os metatonalitos/metatrandhjemitos são compostos principalmente pela associação de quartzo e plagioclásio com quantidades menores de ortopiroxênio, clinopiroxênio e minerais opacos, enquanto o feldspato perthítico é raro, e a hornblenda e a biotita são minerais retrógrados (Pinho *et al.*, 2011). A Figura 2 apresenta algumas mineralogias parentais e autigênicas relacionadas a rochas metabásicas. A Figura 3 apresenta a mineralogia parental e autigênica de metatonalitos/metatrandhjemitos.

As rochas metabásicas são compostas por plagioclásio e piroxênios como minerais primários, e

cloritas, montmorilonita e zeólita clinoptilolita como minerais autigênicos. Os metatonalitos/metatrandhjemitos são majoritariamente representados por quartzo, plagioclásio e piroxênios, além de cloritas, montmorilonita e zeólitas clinoptilolita como minerais autigênicos.

3.2 Modelo Conceitual da Evolução Hidroquímica

3.2.1 Aumento da Salinidade em Razão da Evapotranspiração

Nas porções mais rasas, a interação da água com os aerossóis marinhos resulta em uma água do tipo hidroquímico Na-Cl. Em razão da evapotranspiração, existe um progressivo incremento das concentrações de Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} e Mg^{2+} nas porções mais rasas do aquífero. O incremento de salinidade decorrente da evapotranspiração é concordante com as análises hidrológicas da Bacia do Rio Cachoeira, onde se situa o município de Itabuna, que revela que 85% da precipitação retorna à atmosfera por evapotranspiração. As concentrações de Cl^- representam os melhores indicadores da magnitude do efeito da evapotranspiração.

3.2.2 Interação Água/Rocha

A ausência de minerais carbonáticos nas rochas analisadas, aliado a alcalinidade elevada, bem como elevadas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e SiO_2 , sugerem uma forte interação da água com os minerais que compõem o aquífero. A diversidade na proporção dos cátions observada nas análises químicas apresentadas por Teramoto *et al.* (2018) é governada pelas fases mais abundantes e mais reativas no aquífero. Os metatonalitos/metatrandhjemitos são compostos principalmente por plagioclásio (andesina) e quartzo com ortopiroxênios e clinopiroxênios (Pinho *et al.*, 2011). As metabásicas são compostas por plagioclásios e piroxênios, com anfibólios atribuídos ao retrometamorfismo.

3.3 Resultados da Simulação Geoquímica

Para reproduzir a variabilidade hidroquímica observada e testar o modelo conceitual apresentado,

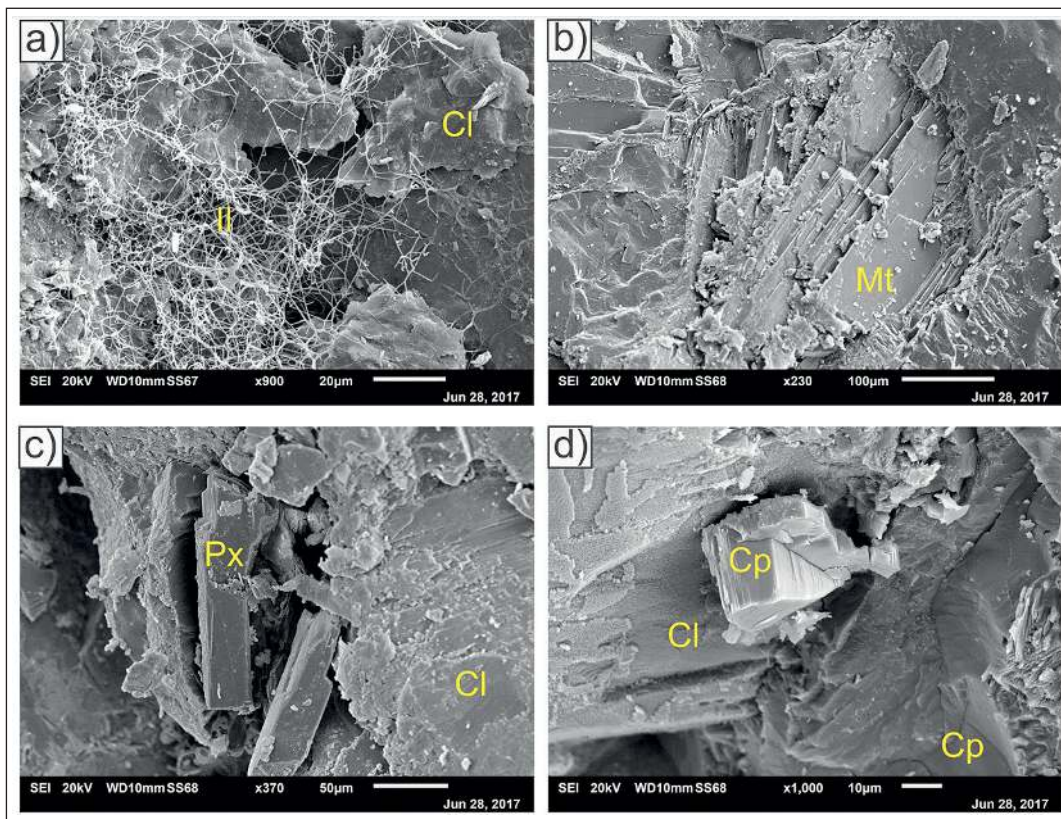


Figura 2 Microscopia Eletrônica de varredura mostrando o conjunto de minerais observados em amostras de rochas metabásicas intemperizadas.
 a. cristais de ilita e clorita;
 b. montmorilonita antigênica;
 c. piroxênios;
 d. clinoptilolita antigênica.
 Px = piroxênio,
 Qz = quartzo;
 Cl = Clorita,
 Cp = clinoptilolita,
 Mt = montmorilonita.

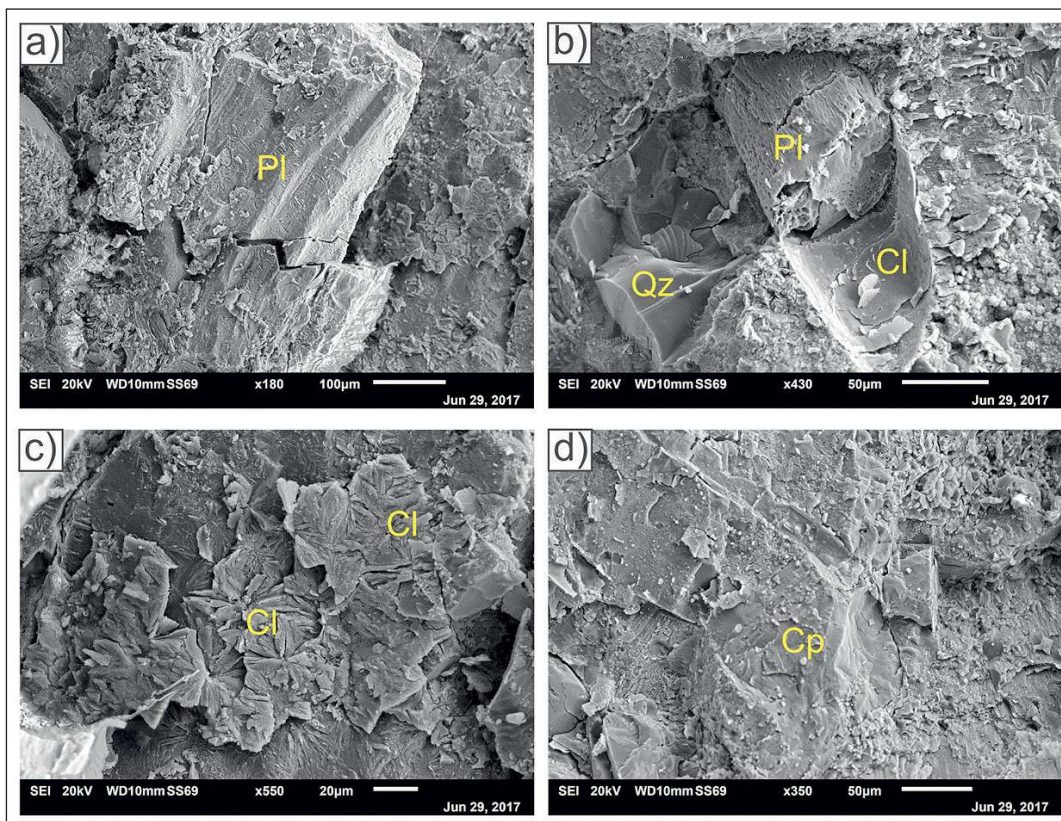


Figura 3 Microscopia Eletrônica de varredura mostrando o conjunto de minerais observados em amostras de metatonalitos/metatondhjemitos.
 A. plagioclásio;
 b. plagioclásio corroído e clorita antigênica;
 c. clorita antigênica;
 d. clinoptilolita antigênica.
 Px = piroxênio,
 Qz = quartzo;
 Cl = Clorita,
 Cp = clinoptilolita,
 Mt = montmorilonita.

um conjunto de simulações geoquímicas foi conduzido para reproduzir a evolução hidroquímica dos aquíferos fissurais da região de Itabuna.

3.3.1 Estágio 1 – Solução Inicial (Solução 1)

A água proveniente da precipitação interage com depositados aerossóis com água do mar transportado do oceano pelas correntes atmosféricas, gerando uma solução do tipo cloretada sódica. A amostra retirada do trabalho de Teramoto *et al.* (2018) denominada P15, de uma fonte ao longo da rodovia Itabuna-Ilhéus foi utilizada como a composição inicial da água.

3.3.2 Estágio 2 – Evaporação da Água no Aquífero Raso

Devido às altas taxas de evapotranspiração observadas na área de estudo, é esperado que tal processo seja responsável pelo incremento do Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} e SO_4^{2-} na solução original. A magnitude da evaporação simulada a partir da subtração de água da solução, baseando-se nas concentrações observadas de Cl^- , uma vez que esta espécie química é conservativa e não provém da dissolução de minerais do aquífero, gerando como resultado a Solução 2 (Tabela 1).

3.3.3 Estágio 3 – Interação Água/Rocha nas Descontinuidades Geológicas

Com base na composição mineralógica, a interação água/rocha foi modelada a partir da reação da água, representada pela Solução 2 (Tabela 1), com a assembleia mineralógica de metatonalitos/metatrandhjemitos e rochas metabásicas. A massa dos minerais que reagiram com a água para obter composições químicas representativas foi obtida por ajustes contínuos na massa de reação das fases minerais nas simulações realizadas.

3.3.3.1 Interação da Água com Rochas Metabásicas

As rochas metabásicas são predominantemente compostas por plagioclásios e anfibólios. Para obter as concentrações de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- , foi simulada a interação da água com as rochas metabólicas a partir da reação da água com 0,35 g de

hornblenda e 0,45 g de albita, 0,40 g de anortita. A solução resultante, referida como Solução 3, é mostrada na Tabela 1.

3.3.3.2 Interação Água Subterrânea com Metatrandhjemitos/Metatonalitos

A interação da água subterrânea com metatrandhjemitos/metatonalitos foi dividida em dois caminhos distintos, Caminhos 2 e 3. O Caminho 2 reproduz a interação da água com metatrandhjemitos/metatonalitos ricos em Ca e Mg, simulando a dissolução de 0,4 de albita e 0,3 g de anortita, 0,3 de hornblenda e 0,03 g de K-feldspato. O Caminho 3 foi simulado para reproduzir a interação da água com metatrandhjemitos/metatonalitos ricos em Na, reagindo a Solução 2 com 1,15 g de albita, 0,4 g de anortita, 0,05 g de enstatita e 0,03 g de K-feldspato.

| Parâmetro | Solução 2 | Solução 3 | Solução 4 | Solução 5 |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH | 4,916 | 7,069 | 6,943 | 6,869 |
| Força iônica | 0,003758 | 0,013752 | 0,010085 | 0,010337 |
| EC (uS/cm) | 329,86 | 847,51 | 709,84 | 760,02 |
| STD (mg/Kg) | 195,06 | 879 | 699 | 786 |
| Na^+ (mg/Kg) | 42,92 | 68,58 | 103,5 | 142,6 |
| Ca^{2+} (mg/Kg) | 8,86 | 63,13 | 39,28 | 29,05 |
| K^+ (mg/Kg) | 0 | 1,786 | 1,424 | 1,224 |
| Mg^{2+} (mg/Kg) | 7,988 | 26,64 | 18,72 | 18,93 |
| Sr^{2+} (mg/Kg) | 0,08429 | 0,07631 | 0,07816 | 0,07813 |
| Ba^{2+} (mg/Kg) | 0,08827 | 0,0859 | 0,08529 | 0,08501 |
| Cl^- (mg/Kg) | 75,68 | 73,99 | 74,38 | 74,51 |
| HCO_3^- (mg/Kg) | 27,98 | 471,0 | 347,2 | 390,4 |
| SO_4^{2-} (mg/Kg) | 17,94 | 13,74 | 15,09 | 15,87 |
| NO_3^- (mg/Kg) | 1,397 | 1,381 | 1,389 | 1,393 |
| F (mg/Kg) | 0,3676 | 0,3391 | 0,3483 | 0,3539 |
| $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$ (mg/Kg) | 6,008 | 18,47 | 5,996 | 22,27 |

Tabela 1 Composição físico-química resultante das simulações representadas em cada estágio.

A Figura 4 apresenta o Diagrama de Piper com as transformações hidroquímicas das águas subterrâneas durante a simulação dos estágios 1, 2 e 3. Parte do cátion e da sílica liberada durante a interação da água com a rocha é precipitada na forma de mineralogia autigênica (Figura 5).

No Caminho 1 (Figura 5a), representando a interação das águas subterrâneas com as rochas metabásicas, foi prevista a precipitação de 0,529 g de Ca-montmorilonita, 0,318 g de Ca-clinoptilolita e

0,029 g de K-clinoptilolita como fases autigênicas. Inicialmente produzida, a precipitação de Mg-montmorilonita que é posteriormente consumida e liberação de Mg de volta para a água subterrânea. No caso de metatonalitos/metatrondhemitos, foi previsto o intemperismo da precipitação mineral autigênica em duas composições rochosas distintas. No Caminho

2 (Figura 5b), simulando a dissolução de rochas ricas em Na⁺, observa-se a produção de 0,530 g de Ca-montmorilonita, 0,318 g de Ca-clinoptilolita e 0,029 g de K-clinoptilolita. No Caminho 3 (Figura 5c), representando as rochas ricas em Ca e Mg, observa-se a precipitação de 0,5083 g de Mg-montmorilonita, 0,430 g de Ca-clinoptilolita e 0,315 g de Na-clinoptilolita.

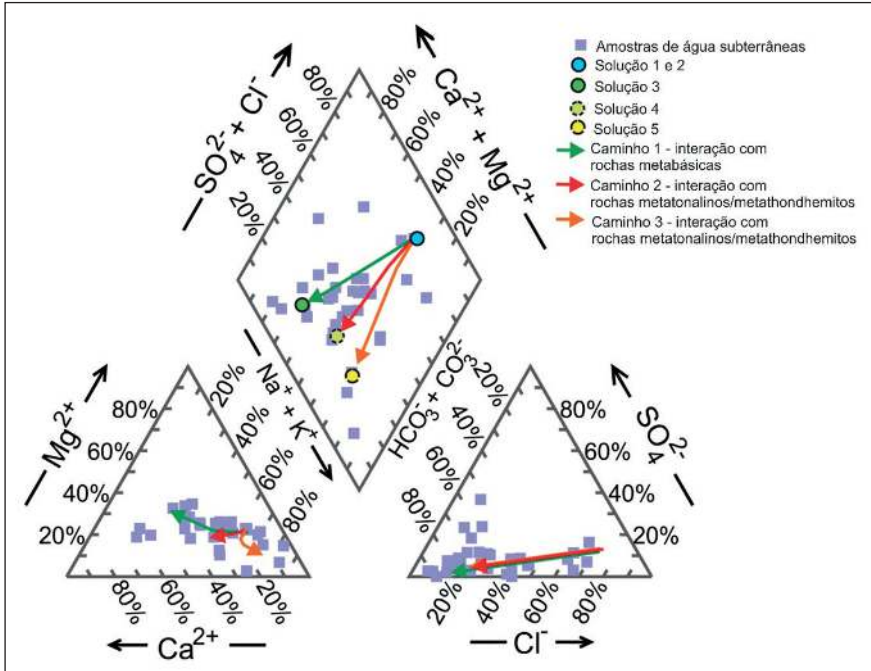


Figura 4 Diagrama de Piper ilustrando os caminhos simulados da evolução hidroquímica das águas dos aquíferos fissurais da região de Itabuna/BA. As amostras das águas subterrâneas apresentadas por Teramoto *et al.* (2018) são apresentadas como referência.

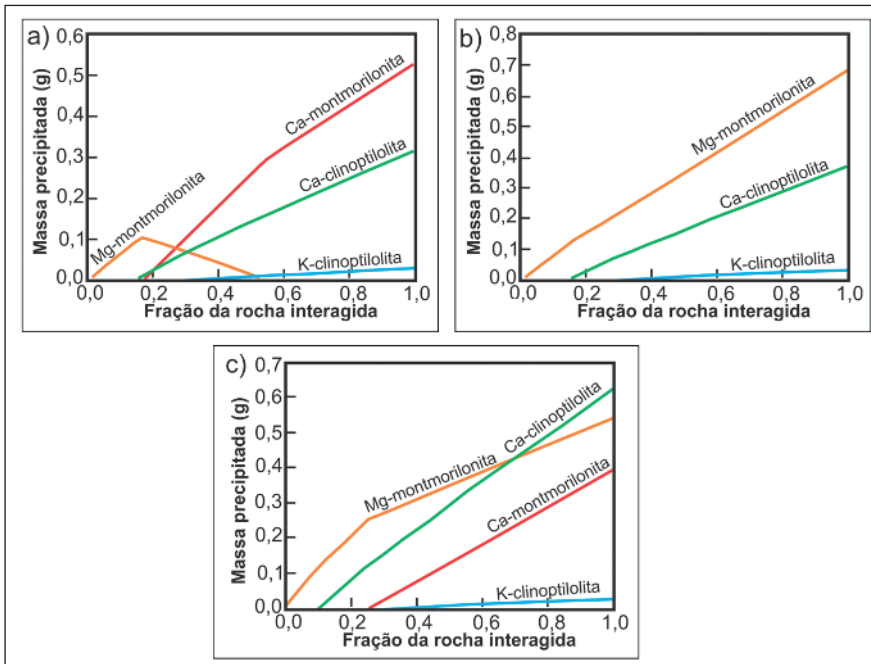


Figura 5 Mineralogia autigênica produzida durante a interação água/rocha. a. interação com rochas metabásicas, gerando a precipitação de Mg-montmorilonita, Ca-montmorilonita, Ca-clinoptilolita e K-clinoptilolita; b. metatonalito rico em cálcio/magnésio, com a produção de Mg-montmorilonita, Ca-montmorilonita e K-clinoptilolita; c. metatonalito rico em sódio produzindo Mg-montmorilonita, Ca-montmorilonita e Ca-clinoptilolita.

4 Discussão

O arcabouço geológico é composto principalmente por tonalitos/trondhjemitos metamorfoseados na fácies granulito, com enclaves isolados de rochas metabásicas e metassedimentares, assim é esperado que as águas subterrâneas reflitam estas variações geológicas. Para investigar os possíveis mecanismos que controlam a interação da rocha com a água, simulações geoquímicas foram realizadas e ajustadas de modo que os resultados destas simulações apresentassem composições e mineralogia autigênica observadas nos aquíferos estudados.

A investigação da composição mineralógica da rocha analisada teve como foco a identificação das fases autigênicas, uma vez que a precipitação desses minerais captura espécies dissolvidas em águas subterrâneas, impulsionando a composição das águas subterrâneas. A clinoptilolita, montmorilonita e clorita representam a assembleia autigênica observada nas rochas intemperizadas. As simulações foram capazes de reproduzir a precipitação de clinoptilolita e montmorilonita.

Os resultados das simulações realizadas sugerem que a evolução hidroquímica dos aquíferos cristalinos na região de Itabuna/BA pode ser explicada pela variação da paragênese mineralógica do aquífero e podem ser descritos por três caminhos distintos. O Caminho 1 foi simulado com rochas metabásicas, compostas principalmente por plagioclásios e piroxênios/anfibólios. A simulação da interação rocha-água foi realizada por reação com labradorita e tremolita. O Caminho 2 foi simulado com andesina e enstatita como representante para os ortopiroxênios da rocha. O Caminho 3 reproduz a interação com o oligoclásio e pequenas quantidades de K-feldspato. Os Caminhos 1, 2 e 3 explicam satisfatoriamente as variações composicionais das amostras de águas subterrâneas, uma vez que a maioria das amostras de águas subterrâneas cai junto ou próximo a essas tendências (Figura 4). Apesar da completa falta de carbonato no aquífero, as águas subterrâneas estudadas são caracterizadas pelas elevadas concentrações de HCO_3^- , com valores médios acima de 300 mg/L (Teramoto *et al.*, 2018). As simulações sugerem que as altas concentrações de HCO_3^- estão associadas à alta reatividade dos plagioclásios e minerais máficos responsáveis pela produção desta espécie química em contexto de sistema aberto em relação ao CO_2 .

5 Conclusões

O armazenamento de águas subterrâneas em aquíferos fissurais da região de Itabuna / BA é amplamente variável e as evidências levantadas sugerem a existência de dois sistemas aquíferos diferentes, com características hidroquímicas distintas. As transformações hidroquímicas das águas subterrâneas são governadas pela combinação de intensa evapotranspiração e dissolução dos minerais que compõem essas rochas. As simulações geoquímicas reproduziram satisfatoriamente as variações hidroquímicas das águas subterrâneas locais devido à interação com os minerais que formam o aquífero. A semelhança entre a composição química das amostras de águas subterrâneas e as soluções geradas pela simulação demonstra a viabilidade do modelo hidroquímico conceitual elaborado. A previsão da mineralogia produzida durante a interação água-rocha composta por zeólitas e montmorilonita assemelha-se à mineralogia autigênica identificada nas amostras de rochas analisadas.

6 Referências

- Barbosa, J.S. & Sabaté, P. 2002. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: a synthesis. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 74(2): 343-359.
- Berkowitz, B. 2002. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Advances in Water Resources*, 25: 861-884.
- Bethke, C.M. & Yeakel, S. 2016. *The Geochemist's Workbench Reference Manual, Release 11.0*. Manual do Usuário. Aqueous Solutions, LLC. Disponível em: <https://www.gwb.com/pdf/GWB11/GWBessentials.pdf>
- Hasegawa, T.; Nakata, K.; Tomioka, Y.; Goto, K.; Kashiwaya, K.; Hama, K. & Takeda, M. 2016. Cross-checking groundwater age by ^4He and ^{14}C dating in a granite, Tono area, central Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 192(1): 166-185.
- Pauwels, H.; Négrel, P.; Dewandel, B.; Perrin, J.; Mascré, C.; Roy, S. & Ahmed, S. 2015. Hydrochemical borehole logs characterizing fluoride contamination in a crystalline aquifer (Maheshwaram, India). *Journal of Hydrology*, 525(1): 302-312.
- Pinho, I.C.A.; Barbosa, J.S.F.; Menezes Leal, A.B.; Martin, H. & Peucat, J.J. 2011. Geochemical modelling of the tonalitic and trondhjemitic granulites from the Itabuna-Salvador-Curaçá Block, Bahia, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(2): 312-323.
- Teramoto, E.H.; Engelbrecht, B.; Gonçalves, R.D. & Chang, H.K. 2018. Caracterização Hidroquímica e Isotópica dos Aquíferos Fissurais da Região de Itabuna/BA. *Águas Subterrâneas*, 32(2):138-147.
- Wanner, C.; Bucher, K.; von Strandmann, P.A.P.; Waber, H. N. & Pettke, T. 2017. On the use of Li isotopes as a proxy for water-rock interaction in fractured crystalline rocks: A case study from the Gotthard rail base tunnel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 198(1): 396-418.