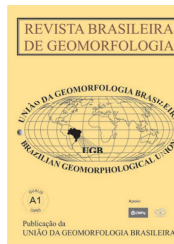


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 19, nº 1 (2018)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1214>



### INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE AQUÍFEROS CÁRSTICOS NA EVOLUÇÃO DO RELEVO: PORÇÃO CENTRAL DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA, BRASIL

### INFLUENCE OF HYDROGEOLOGICAL ASPECTS OF KARST AQUIFERS ON EVOLUTION OF LANDSCAPE: IN THE CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA, BRAZIL

**Lucas de Queiroz Salles**

*Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia  
Campus Universitário de Ondina, Salvador, Bahia. CEP: 40170-115. Brasil  
Email: lucassalles2008@gmail.com*

**Luiz Rogério Bastos Leal**

*Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia  
Rua Barão de Geremoabo, S/N, Salvador, Bahia. CEP: 40050-090. Brasil  
Email: lrogerio@ufba.br*

**Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira**

*Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia  
Campus Universitário de Ondina, Salvador, Bahia. CEP: 40170-115. Brasil  
Email: fraga.pereira@ufba.br*

**Fernando Verassani Laureano**

*Instituto de Ciências Biológicas e Saúde, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais  
Rua do Rosario 1081, Betim, Minas Gerais. CEP: 32630-000. Brasil  
Email: fernandolaureano@pucminas.br*

**Thiago dos Santos Gonçalves**

*Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia  
Campus Universitário de Ondina, Salvador, Bahia. CEP: 40170-115. Brasil  
Email: t.gon@outlook.com*

#### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
29/01/2017  
Aceito (Accepted):  
03/08/2017

#### Palavras-chave:

Geomorfologia Cárstica;  
Aquífero Cárstico; Grupo Una.

#### Resumo:

O presente trabalho discute como o funcionamento hidrogeológico do aquífero cárstico condiciona e interage com a evolução morfológica do relevo. O sistema cárstico situado na porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil abriga um conjunto de sítios espeleológicos de relevância no país. A região é palco de importantes descobertas científicas, particularmente relacionados à espeleologia e evolução dos terrenos cársticos. Entretanto, a compreensão das relações existentes entre a morfologia e a hidráulica subterrânea ainda estão pouco exploradas. Com esse intuito, foram realizados estudos comparativos entre as feições morfológicas

**Keywords:**

Karst Geomorphology; Karst Aquifer; Group Una.

do terreno e dados de capacidade específica de poços tubulares, apoiados por dados hidrogeoquímicos e de isótopos estáveis ( $\delta^{13}\text{C}$ ). As feições superficiais do terreno mostraram correlação com os dados de capacidade específica, principalmente levando em consideração a distribuição de dolinas. Já quando comparados com a profundidade, os dados de capacidade específica apresentaram dois intervalos de maior produtividade: o primeiro para poços com menos de 60 metros de profundidade, e o segundo para poços com profundidade variando entre 91 e 120, sugerindo uma maior conexão hidráulica nesses intervalos de classe. A evolução morfológica da área estudo é, provavelmente, intrínseca a coalescência de dois processos de carstificação distintos: a carstificação hipogênica e a epigênica, que conotam ao sistema características distintas.

**Abstract:**

The present work discusses how the hydrogeological functioning of the karst aquifer conditions and interacts with the morphological evolution of the landscape located in the central portion of the Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. This karst system houses a relevant speleological sites in the country. The region is the scene of important scientific discoveries, particularly related to speleology and evolution of karstic landscape. However, the understanding of the relationships between morphology and groundwater hydraulics is still little explored. For this purpose, comparative studies were performed between the morphological features of the terrain and specific capacity data of tubular wells, supported by hydrogeochemical and stable isotope data ( $\delta^{13}\text{C}$ ). The surface features of the terrain showed a correlation with the specific capacity data, mainly considering the distribution of dolines. When compared with depth, the specific capacity data presented two intervals of higher productivity: the first for wells with less than 60 meters depth, and the second for wells with depth ranging between 91 and 120, suggesting a greater hydraulic connection in these class intervals. The morphological evolution of the study area is probably intrinsic to the coalescence of two distinct karstification processes: hypogenic karstification and epigenetic, which connote different characteristics of the system.

**1. Introdução**

A evolução morfológica do sistema cárstico está vinculada à um conjunto de processos e fenômenos físicos e químicos, associados à interação água-rocha. Essa interação é responsável pelo desenvolvimento da porosidade terciária que condiciona a hidráulica subterrânea nos aquíferos cársticos. Para essas regiões a caracterização geomorfológica consiste em um dos principais recursos para a compreensão hidrogeológica (FORD e WILLIAMS, 2007).

A dissolução química é o principal processo que associa a evolução do aquífero ao relevo cárstico. Esse ocorre pela combinação da água com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), proveniente da atmosfera e enriquecido no solo. O resultado é uma solução de ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), ou água ácida, responsável pela carstificação epigênica. Este processo pode ser ampliado ainda pela entrada no sistema de águas alogênicas, que podem contribuir com a agressividade da água à rocha. Outro modelo importante para a evolução do aquífero é a carstificação hipogênica, comumente associada a

formação de ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) por hidrólise de sulfetos dispersos no maciço rochoso. Esse processo pode ainda ocorrer devido a oxidação de sulfetos, possibilitando a formação de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), altamente corrosivo (SALVATI e SASOWKY, 2002; AUDRA *et al.*, 2007; PALMER, 2011; KOLEINI *et al.*, 2013; ENNES – SILVA *et al.*, 2015).

O isótopo estável do carbono ( $\text{C}^{13}$ ) consiste em uma importante ferramenta no estudo de interação entre o sistema água-rocha, principalmente, para rochas carbonáticas. À medida que a água subterrânea dissolve a rocha, seu valor isotópico ( $\delta\text{C}^{13}$ ) tende a valores mais positivos (MOOK E VERRES, 2001). Segundo Klimchouk *et al.* (2016) os carbonatos do Grupo Una, na região de Campo Formoso, possuem um valor isotópico, para  $\delta\text{C}^{13}$ , variando de aproximadamente -7 a 2.

A capacidade específica, também conhecida como vazão específica de um poço é uma relação entre vazão (Q) e a variação na carga hidráulica (s) para um determinado tempo (t). Este parâmetro, em geral, é

utilizado para expressar a produtividade de um poço (TAM *et al.*, 2004; MCCOY *et al.*, 2008; YIDANA *et al.*, 2008; FARRAH *et al.*, 2013).

O sistema cárstico aqui estudado situa-se na porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (Figura 1a) e possui como limite norte o alto topográfico de Souto Soares, proposto por Negrão (1986). Estudos realizados nos carbonatos na região culminaram com o cadastramento de mais de uma centena de cavidades, de modo que a área representa o local de maior densidade de condutos subterrâneos por unidade de área do país (AULER e FERRANT, 1996).

Para além destes fatos, a região estudada é também alvo de importantes investigações científicas, principalmente aquelas relacionadas a mudanças paleoambientais (BARRETO, 2010; BICHUETTE *et al.*, 2015; LAUREANO *et al.*, 2016), e a participação de ácido sulfúrico na evolução dos condutos cársticos (VALLE, 2004). Entretanto, o estudo da relação do relevo com os aspectos hidrogeológicos ainda não foram explorados.

Esse trabalho tem por objetivo compreender como a evolução hidrogeológica, na porção meridional da Bacia de Irecê interage e determina sua evolução morfológica, e discutir como as características hidrogeológicas atuais ajudam na composição da história do relevo cárstico.

## **2. Área de Estudo**

O substrato geológico da área estudada é composto de um arranjo litoestratigráfico de idade mesoproterozoica, predominantemente de natureza detrítica, rica em sílica, representadas, pelas formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu (da base para o topo) correspondendo ao Grupo Chapada Diamantina, e uma espessa sequência carbonática, de idade neoproterozoica referente ao Grupo Una (Supergrupo São Francisco). Recobrimo esses materiais, ocorrem de forma descontínua coberturas detríticas Cenozóicas (Figura 1 b) (MISI, 1979; BONFIM *et al.*, 1985; SOUZA *et al.* 1993, SOUZA *et al.* 2002, PEDREIRA, 2004).

O Grupo Una repousa de forma discordante

sobre os metassedimentos de baixo grau metamórfico do Grupo Chapada Diamantina e é formada da base para o topo pelas Formações Bebedouro e Salitre. A Formação Bebedouro é composta, predominantemente, por metassiltitos, metargilitos e metadiamicititos. Já a Formação Salitre, alvo do estudo, é constituída essencialmente por calcissiltitos, dolomitos e lamitos criptoalgal, ligeiramente ondulados em sua seção basal, gradando para calcilutitos, calcarenitos, dolarenitos e dololulititos oolíticos no topo (Figura 1 c), e na região de Iraquara compõem as unidades litoestratigráficas Jussara Superior, Nova América Superior e Nova América Inferior (SOUZA *et al.* 1993).

Associadas às rochas carbonáticas do Grupo Una são reconhecidas duas fases de deformação compressivas, sobrepostas durante o neoproterozoico. Como consequência, ocorrem falhas abertas com eixo, preferencialmente, N-S e lineamentos estruturais associados à falhas de empurrão com direção N-S. (GUERRA 1986; PEDREIRA *et al.*, 1987; BASTOS LEAL *et al.* 2004; RAMOS *et al.* 2007). A recarga no sistema aquífero ocorre de duas formas distintas. A recarga autogênica é derivada unicamente da precipitação direta sobre os a área superficial do aquífero. Na outra mão, ocorre a recarga alogênica, decorrente de águas que percolam sobre as rochas do Grupo Chapada Diamantina e fluem em direção ao aquífero (Figura 1 d).

## **3. Materiais e Métodos**

Para realização deste trabalho foram utilizados cinco conjuntos de dados. Estes incluem dados geológicos (levantamentos bibliográficos e mapeamento de campo), mapa de fenômenos cársticos, análise laboratoriais, imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Termal Emission and Reflection Radiometer*) GDEM (NASA / METI) com resolução de 30 metros e observações do relevo em campo. A partir desses dados foram elaborados mapas litológico (CPRM, 2003), de densidade de lineamentos (Figura 6a) e densidade de feições cársticas (Figura 3) no software ArcMap 10.1, além de mapas de hipsometria (Figura 2) e declividade para a caracterização do relevo. Esses métodos serão descritos sequencialmente.

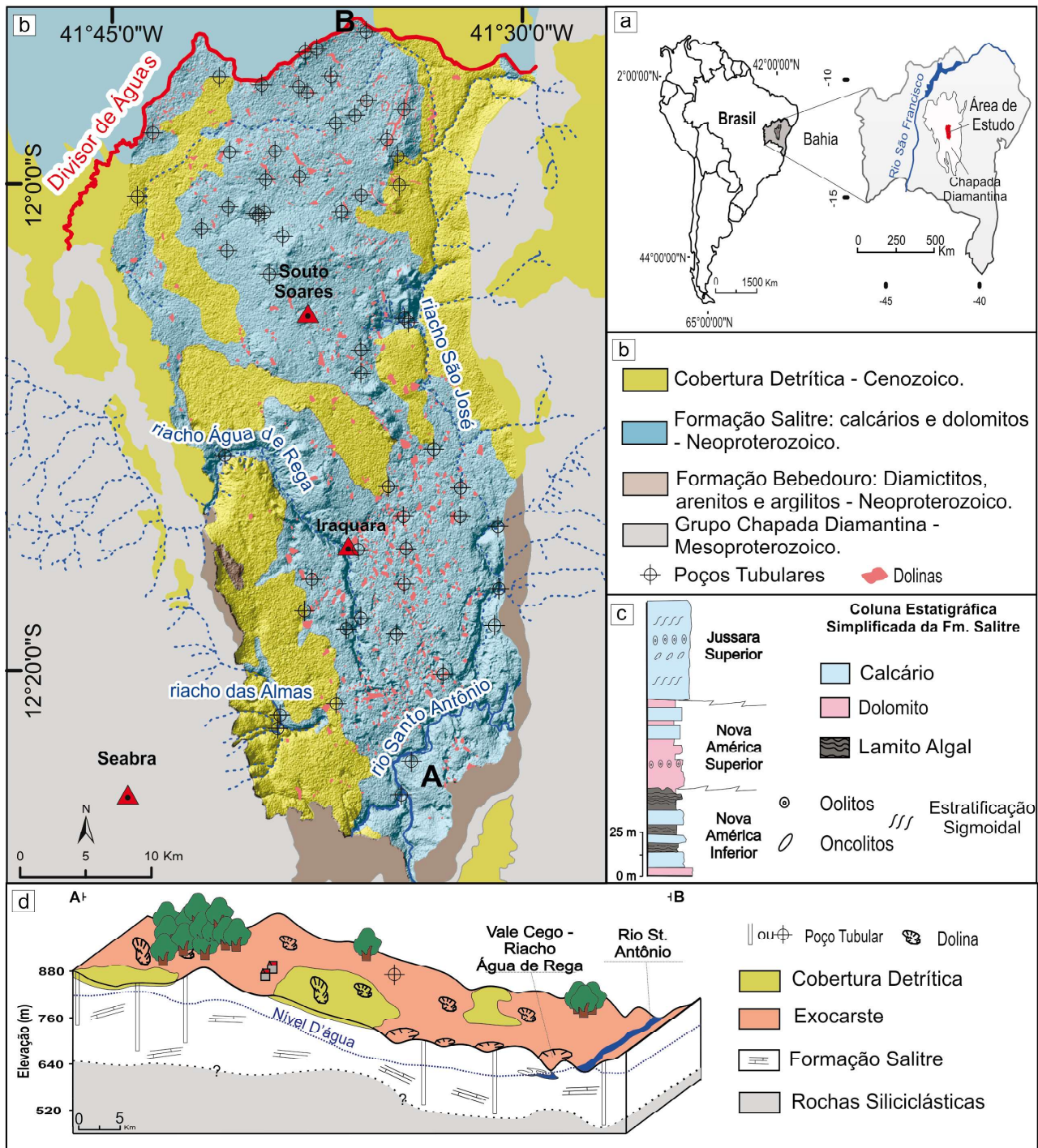


Figura 1 - (a) Mapa de localização da área de estudo, (b) Mapa geológico simplificado (IBGE/SEI, 2013); (c) Coluna estratigráfica simplificada de Pedreira, 2004; e (d) Bloco diagrama esquemático para a área de estudo.

### 3.1 Dados hidrogeológicos e Análises Laboratoriais

Para o cálculo de capacidade específica foram utilizados dados hidrogeológicos de 75 poços tubulares, todos eles perfurados pela Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB). Na caracterização hidroquímica foram coletas 18 amostras de água no mês de julho de 2015. Durante essa coleta,

foram medidos em campo os parâmetros: temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD), além do posicionamento geográfico dos poços, este último utilizando-se um GPS de navegação. As amostras de água coletadas para análise de cátions e ânions, foram filtradas em conjunto Millipore, utilizando filtros de 0,45µm e os frascos fechados foram conservados sob refrigeração, para posterior análise

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, 1998). A determinação dos cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{SO}_4^-$ ) foi realizada através de cromatografia iônica, enquanto a alcalinidade ( $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ) foi obtida por titulação. Para cálculos dos índices de saturação dos minerais foi utilizado o *software* PHREEQC (PARKHURST, 1999).

As análises de isótopos de  $\delta\text{C}^{13}$  foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA-CPGG/IF-UFBA). Para isso, foi utilizado um sistema contendo um espectrômetro de massas de razão isotópica-MS Finnigan MAT Delta Plus e um reator automático H-Device Thermo Quest Finnigan.

### 3.2 Confeção de mapas base

O mapa de densidade de lineamentos (Figura 6a), foi gerado a partir da ferramenta *LineDensity* do programa ArcMap 10.1. Os lineamentos foram traçados por meio de cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens, de acordo com a interpretação de imagens de relevo sombreado geradas com base em azimutes  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Com o intuito de construir um inventário cartográfico, foi elaborado um mapa de fenômenos cársticos (Figura 3). Esse consiste na extração de dolinas e vales cársticos, a partir da análise de fotografias áreas na escala 1:60.000. Posteriormente, as fotografias áreas foram escaneadas e vetorizadas no *software* ArcMap 10.1. O mapa de densidade de dolinas (Figura 6b) consiste na interpolação de pontos centrais (unidade de dolina) na ferramenta *Density* do *software* ArcMap 10.1.

Os mapas de isoconcentrações ( $\delta\text{C}^{13}$  e  $\text{SO}_4^-$ ) foram elaborados a partir da técnica IPD (Inverso da Ponderado da Distância). Essa técnica se baseia na dependência espacial, estimando um valor para um dado local não amostrado, como uma média dos valores dos dados dentro de sua vizinhança.

### 3.3 Confeção dos mapas temáticos de hipsometria, declividade

A partir da imagem ASTER GDEM (NASA/METI), adquirida gratuitamente a partir da galeria *online* da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), foi elaborado o modelo digital de terreno (MDT) (Figura 2).

O aspecto em três dimensões é atribuído a sobreposição de imagens de relevo sombreado, com iluminação em  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e transparência de 50%. Ainda de posse da imagem ASTER, o mapa de declividade foi gerado a partir da ferramenta *Slope* do *software* ArcScene 10.1.

## 4. Resultados e Discussões

A porção meridional da Bacia de Irecê é constituída por rampas suavemente inclinadas e onduladas, com declividades variando entre 0 e 12%. Os vales e as dolinas de colapso são responsáveis pela quebra na monotonia do relevo e suas escarpas correspondem aos locais de maior declividade. Topograficamente, essa área apresenta altitudes variando entre 880 a 640 metros (Figura 2), onde se observa diminuição na altitude da porção Norte para Sul. As menores cotas associam-se ao vale do rio Santo Antônio, que apresenta vertentes escarpadas e possui como principal exutório a nascente da Pratinha.

As formas de relevo cárstico encontradas são basicamente depressões cársticas na forma de dolinas e uvalas. Estas geoformas se concentram em faixas com orientação preferencial NW – SE e, subordinadamente, N – S, ocupando 3,64% da área total, com 1,03 dolina por  $\text{km}^2$  (Figura 3). Segundo Cruz Junior (1998), as depressões cársticas na região, podem ser classificadas em dois grupos: (i) dolinas de colapso, correspondem à depressões fechadas, com perfil escarpado; e (ii) dolinas de sufusão, representadas por depressões com perfis suaves, associadas a subsidência lenta causada pela remoção e infiltração de material detrítico.

Amaral *et al.* (1997) e posteriormente Harman *et al.* (1998), com base em técnicas de traço de fissão em apatita, estimaram uma taxa de desnudação para o Cráton do São Francisco na ordem de 18-40 m/Ma. Todavia, incertezas associadas ao gradiente térmico na área (estimado entre 15-30  $^\circ\text{C}/\text{Km}$ ) impediu um valor numérico mais preciso (Auler, 1999). Considerando-se o valor médio, na ordem de 29m/Ma, seriam necessários aproximadamente 6,89 Ma para a formação do desnível referente a variação topográfica da região, tento como nível de base o rio Santo Antônio. Sendo assim o início da carstificação na região se daria do Mioceno Superior / Pleistoceno, cronocorrelato a Superfície Sulamericana 1 (Valadão, 1998) e o início da carstificação na região dos currais de pedras, Jequitaiá – Minas Gerais (Gonçalves *et al.* 2017). Vale salientar que esse trabalho não levou em consideração a taxa de erosão fluvial, o que pode acarretar em um importante erro analítico.



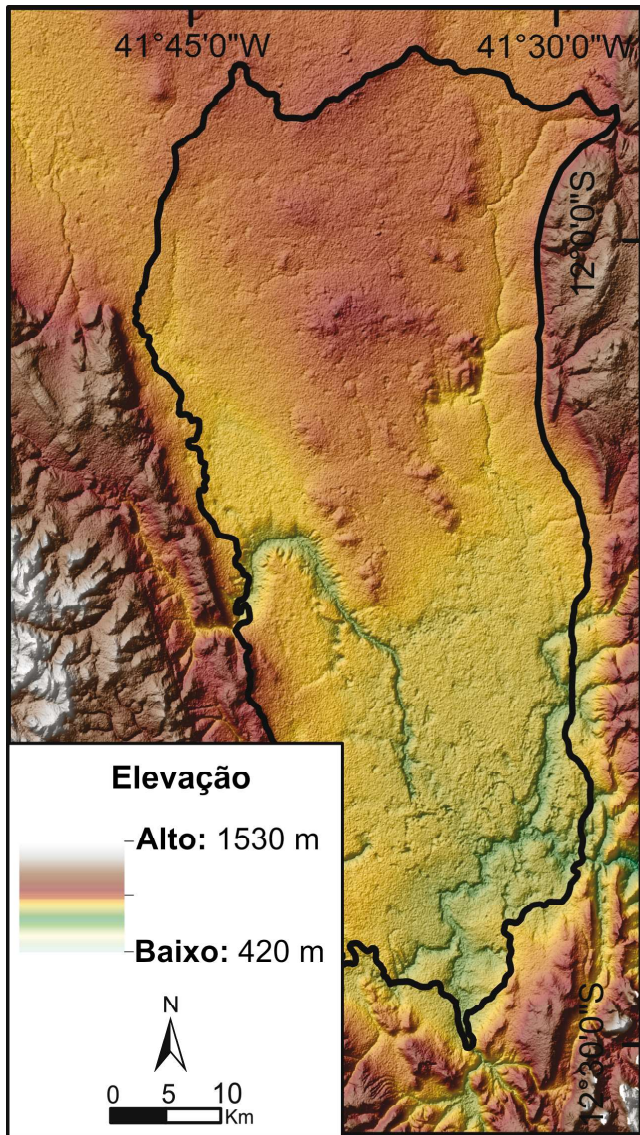


Figura 2 - Modelo digital de elevação, elaborado a partir de imagem ASTER GDEM com resolução de 30 metros.

As análises físico-químicas e os parâmetros geoquímicos calculados estão demonstrados na Tabela 1. Águas tendem a precipitar calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) quando saturadas nesses componentes, e dissolvê-los quando insaturadas. O índice de saturação (IS) é o parâmetro mais utilizado para quantificar a saturação de fases minerais na água subterrânea. O resultado no cálculo dos IS demonstrou que as águas em estudo se apresentam saturadas, ou parcialmente saturadas em calcita e dolomita (Figura 4). O índice de saturação para a calcita variou de -0,01 a 1,24. Já o índice de saturação em dolomita variou entre -0,48 e 2,44, sugerindo que essas águas apresentam pouca agressividade para dissolver essas fases minerais

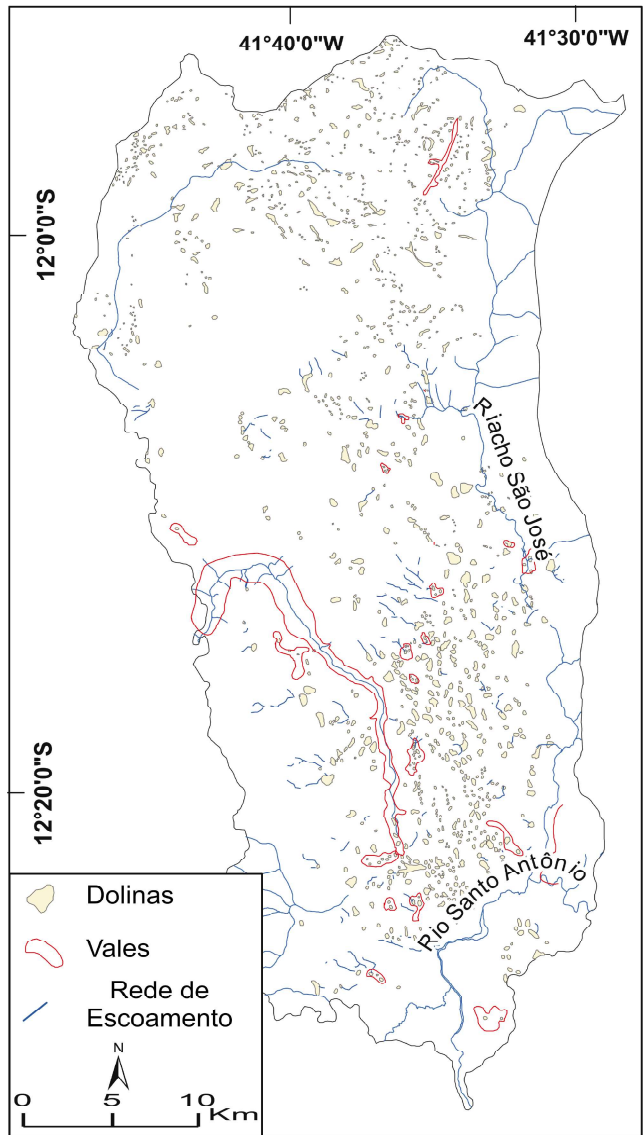


Figura 3 - Mapa de fenômenos cársticos, elaborado a partir de fotointerpretação na escala 1:60.000.

presentes na rocha.

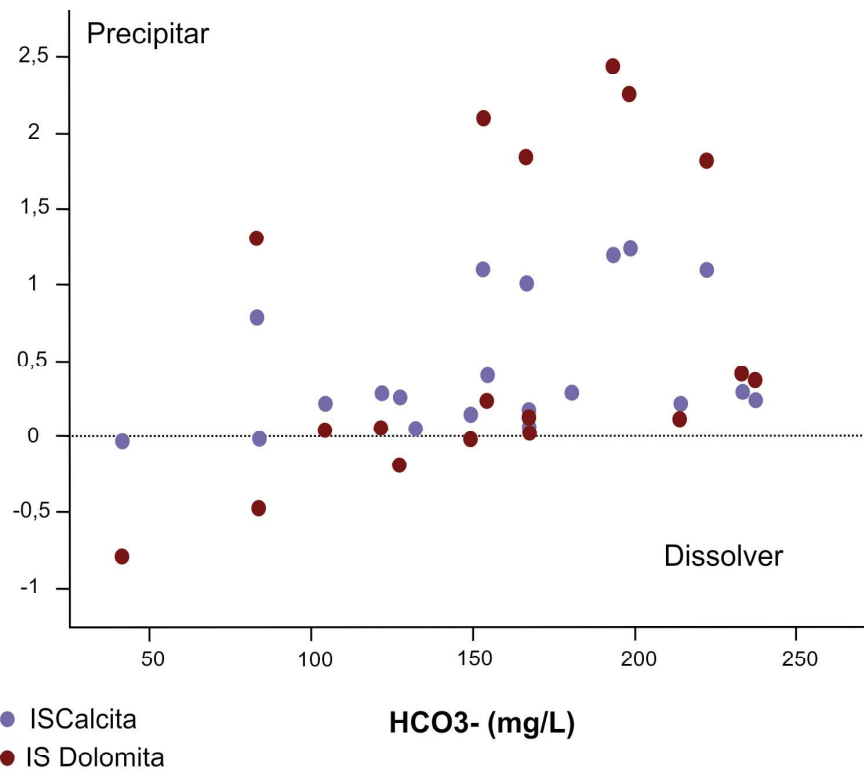
O principal processo de dissolução da rocha, na área de estudo, é um tema ainda bastante controverso. Segundo Palmer (2011), quando o ácido carbônico é o principal responsável pela dissolução da rocha, o índice de saturação mineral (IS), apresentará uma dependência em função da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  ( $P_{\text{CO}_2}$ ), da temperatura e dos sólidos totais dissolvidos (STD). Fato semelhante foi verificado por Florea (2015) em um estudo equivalente no aquífero cárstico localizado na bacia do rio Cumberland, sudeste do estado de Kentucky – EUA. A Tabela 2 representa uma matriz de correlação de Spearman, para dados não paramétricos, entre o IS em calcita, IS em dolomita, temperatura,  $P_{\text{CO}_2}$  e STD.

A não dependência entre os elementos, evidenciada pelos baixos coeficientes de correlação entre eles, sugeriu que o processo de dissolução da rocha por ácido

carbônico não é dominante no sistema. Sendo assim, outro processo seria necessário para explicar a evolução morfológica do relevo.

**Tabela 1: Dados hidroquímicos, físico-químicos e parâmetros calculados para área de estudo, coletados em julho de 2015.**

Amostra	Descrição	T (°C)	STD (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	IS <sub>Cal</sub>	IS <sub>Dol</sub>	ISGip	P <sub>CO<sub>2</sub></sub> (Pa)
L1-01	Afloramento do Nível Estático	20,21	142	83,5	1,9	2,9	12,3	-0,01	-0,48	-3,84	0,49
L1-02	Poço Tubular	24,17	592	214	17,6	34,1	14,4	0,22	0,12	-2,57	0,28
L1-03	Poço Tubular	26,23	287	193	4,6	14	9,2	1,2	2,44	-3,58	1,60
L1-04	Nascente	24	747	127	4,6	38,7	5,3	0,26	-0,19	-3,09	0,20
L1-05	Afloramento do Nível Estático	21,6	910	121	28,7	48,4	10,3	0,29	0,05	-2,23	0,15
L1-06	Poço Tubular	24,49	752	104	9	33,2	8,6	0,22	0,04	-2,85	0,34
L1-07	Poço Tubular	24,31	428	222	22,1	31,6	10,9	1,1	1,82	-2,52	0,39
L1-08	Poço Tubular	26,66	1590	237	41,8	59,9	38,4	0,25	0,38	-2,12	0,20
L1-09	Afloramento do Nível Estático	23,29	473	153	17,9	22,6	12,4	1,1	2,1	-2,74	0,61
L1-10	Poço Tubular	24,81	535	149	5,2	24,6	8,8	0,15	-0,02	-3,14	0,19
L1-11	Nascente	25,78	394	167	5	19,6	11,1	0,09	0,04	-3,30	0,19
L1-12	Poço Tubular	25,44	427	166	3,9	20,2	9,2	1,01	1,84	-3,43	0,54
L1-13	Poço Tubular	25,15	1810	82,8	202	131,8	38,4	0,79	1,3	-1,19	0,35
L1-14	Poço Tubular	24,45	829	198	19,6	49,9	21,6	1,24	2,25	-2,42	0,28
L1-15	Poço Tubular	25,33	699	180	13,7	45,4	13,7	0,29	0,17	-2,57	0,11
L1-16	Poço Tubular	24,71	1160	233	19,9	67,2	35,9	0,3	0,42	-2,35	0,23
L1-17	Poço Tubular	23,54	309	132	2	16,9	10,8	0,05	0,03	-3,74	0,22
L1-18	Afloramento do Nível Estático	25,29	455	167	10,3	26,4	11,4	0,17	0,09	-2,87	0,16



*Figura 4 - Índice de saturação (Is) em calcita e dolomita versus o bicarbonato para as amostras analisadas. Ressalta-se a baixa capacidade em dissolver calcita e dolomita da água.*

**Tabela 2: Matriz de correlação de Spearman entre o índice de saturação em calcita, dolomita, STG, temperatura e PCO<sub>2</sub>, exemplificados na tabela 1.**

Matriz de Corelação	Is - Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	Is - Dolomita (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	STD (g/L)	Temp. (°C)	PCO <sub>2</sub> (Pa)
Is - Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	1,0				
Is - Dolomita (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	0,9	1,0			
STD (g/L)	0,2	0,1	1,0		
Temperatura (°C)	0,0	0,3	0,0	1,0	
PCO <sub>2</sub> (Pa)	0,5	0,5	-0,4	-0,1	1,0

O bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é o principal ânion formado pelo processo de dissolução por águas epigênicas. Por outro lado, terrenos cársticos formados por processos hipogênicos tendem a liberar tanto o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> quanto o sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (AULLER e SMART, 2003). A evolução do processo de dissolução da rocha libera,

como principais cátions, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na água. Uma correlação entre a Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e bicarbonato, demonstrou um coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) na ordem de 0,772 (Figura 5a). Em contrapartida, uma correlação entre a Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> em função do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, demonstrou r<sup>2</sup> na grandeza 0,894 (Figura 5b).

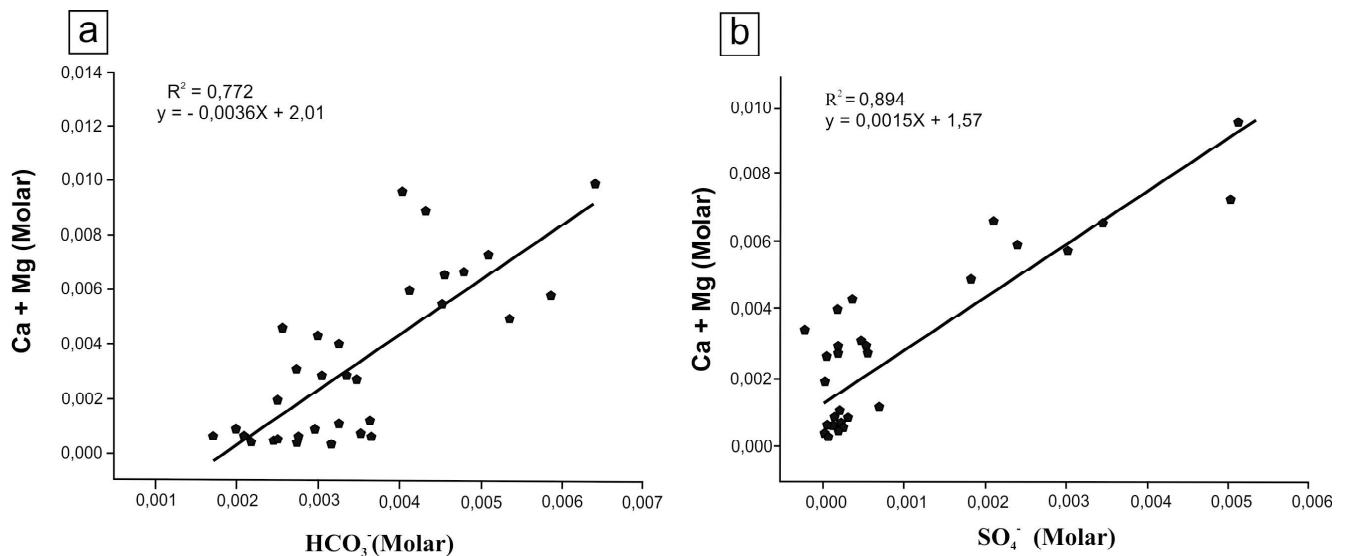


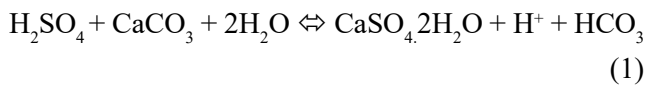
Figura 5 - Correlação entre Dureza (Ca + Mg) em função do bicarbonato (a) e do sulfato livre (b). Para a confecção dos gráficos foram utilizados resultados de análise de amostras coletadas nessa pesquisa e análises de amostras cedidas pela Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia – CERB.

Sendo a dissolução da rocha carbonática exclusivamente controlada pela adição de ácido carbônico no sistema, a correlação 3a deveria apresentar um coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) maior, quando comparado a 3b, entretanto, foi observado um elevado coeficiente de correlação em 3b. Isso indica que o processo de dissolução hipogênico tem papel importante na evolução do sistema cárstico, assim como observado por Auler e Smart (2003) no Carste de Campo Formoso, Valle (2004) nas bacias de Irecê e Una-Utinga e Santos (2008) na bacia do rio Salitre.

Aqui, atribui-se a dissolução hipogênica ao ácido sulfídrico, formado a partir da hidrólise de sulfetos disseminados na rocha. O principal subproduto do processo de dissolução hipogênico (Equação 1) é a Gipsita (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Esse mineral apresentou índices de saturação variando entre -1,19 a -4,03, valores consideráveis quando comparados com o IS<sub>cal</sub> e o IS<sub>dol</sub> (Tabela 1). Segundo Salles (2017) as rochas da unidade Novo América, que embasa a Formação Salitre, são classificadas como lamitos criptoalgais constituído predominantemente por micrita, por vezes dolomitizada,



com pirita dispersa na matriz. A carstificação hipogênica ocorre na área de estudo, possivelmente, associada a hidrólise desse sulfeto disperso no maciço rochoso.



A Figura 6 ilustra a distribuição de intervalos de classes da profundidade dos poços tubulares na região, em função da capacidade específica (Sc) (m<sup>3</sup>/h/m), utilizando a mediana para classificação quanto a Sc. A Sc atinge os maiores valores nos intervalos entre 91 e 120 metros e menor que 60 metros, sugerindo uma maior conexão hidráulica nesses intervalos de classe. Uma

maior conectividade em zonas de distintas, sugere, que a carstificação ocorreu pela coalescência de processos de dissolução. A carstificação hipogênica é dominante no sistema e, possivelmente, foi responsável pelos elevados valores de Sc na zona mais profunda (entre 91 e 120). Entretanto o processo de dissolução epigênica também exerce importante papel na carstificação e formação do modelado, sendo, o responsável pela elevada conectividade na zona mais rasa do aquífero. Segundo Laureano *et al.* (2016) os sistemas de cavernas foram palco de pelo menos dois milhões de anos de injeção de sedimentos detríticos, característicos de uma evolução epigênica, que podem ter mascarado possíveis feições morfológicas hipogênicas pré-existentes.

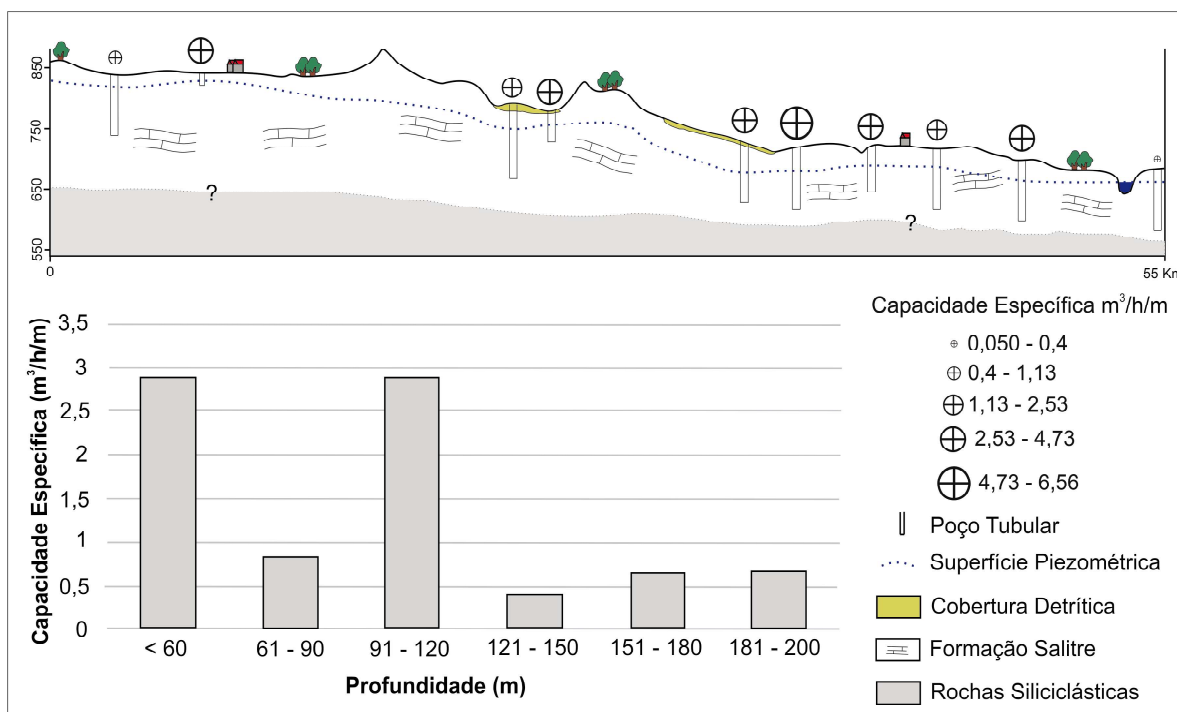


Figura 6 - Distribuição de intervalos de classes em relação a profundidade, em função da capacidade específica (m<sup>3</sup>/h/m) de poços tubulares, na região. Seção hidrogeológica referente ao bloco diagrama esquemático da área de estudo (Figura 1d).

A permeabilidade terciária (WHITE, 1999; WHITE, 2002) em rochas carbonáticas está relacionada ao desenvolvimento do relevo cárstico. Daí, faz-se necessário compreender a interação entre o arranjo geométrico superficial e o carste subterrâneo – endocarste. A Figura 6 demonstra uma relação entre a densidade de lineamentos (Figura 7a), a quantidade de dolinas por área ou índice de dolineamento (Figura 7b), em função da capacidade específica (m<sup>3</sup>/h/m) de poços tubulares. Com isso, observou-se que a coalescência de lineamentos

pouco interfere nos dados de capacidade específica de poços tubulares na região. Entretanto, a densidade de dolinas exerceu uma moderada influência sobre os dados de Sc. Fato similar foi observado por Tam *et al.* (2004) em um aquífero cárstico similar no norte do Vietnã. Nessa região a relação ficou evidente em pequenos vales com encostas íngremes, todavia, é menos visível em áreas de com pouca variação topográfica.

Percebeu-se ainda uma relação entre a altitude e dados de capacidade específica. Apesar, de não existir

uma correção linear direta entre esses dados, de maneira geral, poços instalados em altitudes menores apresentam maiores valores de capacidade específica (Figura 8). A porção topograficamente mais rebaixada coincide com as principais áreas de descarga autogênica dos

riachos Água de Rega, das Almas e São José. Devido a isso, ocorreu uma grande inserção de águas com elevada agressividade no sistema, culminando num aumento da porosidade terciária, e conseguinte maior permeabilidade da rocha.

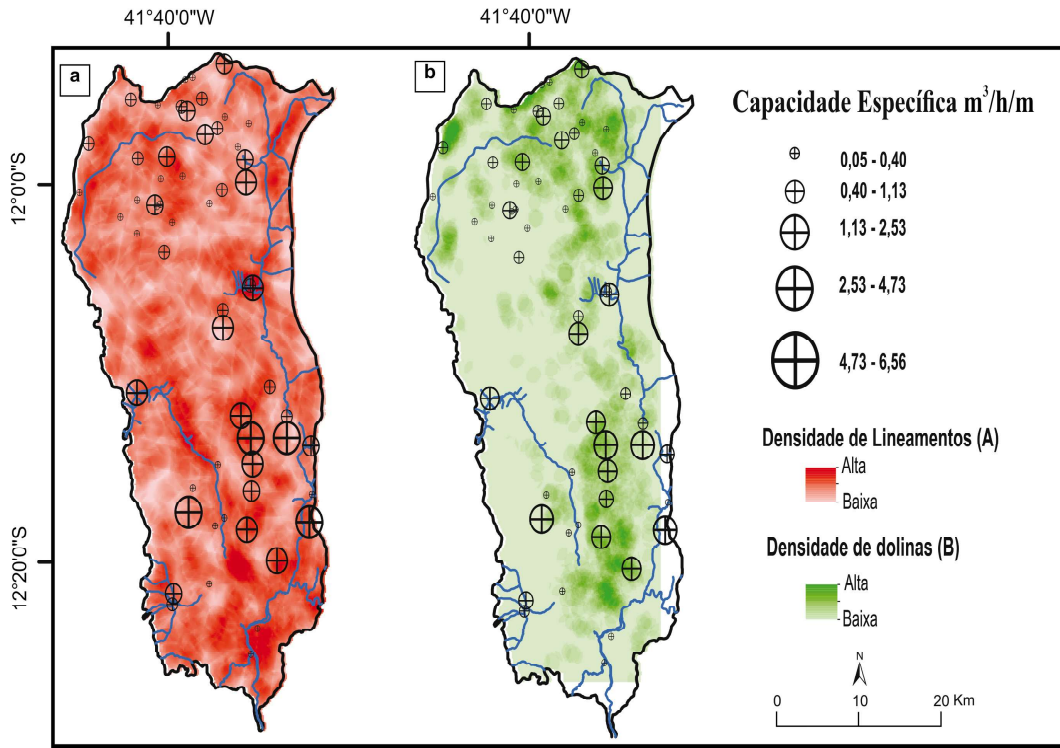


Figura 7 - Capacidade Específica ( $m^3/h/m$ ) em função: da densidade de lineamentos (a); e índice de dolineamento ou unidade de dolina (b).

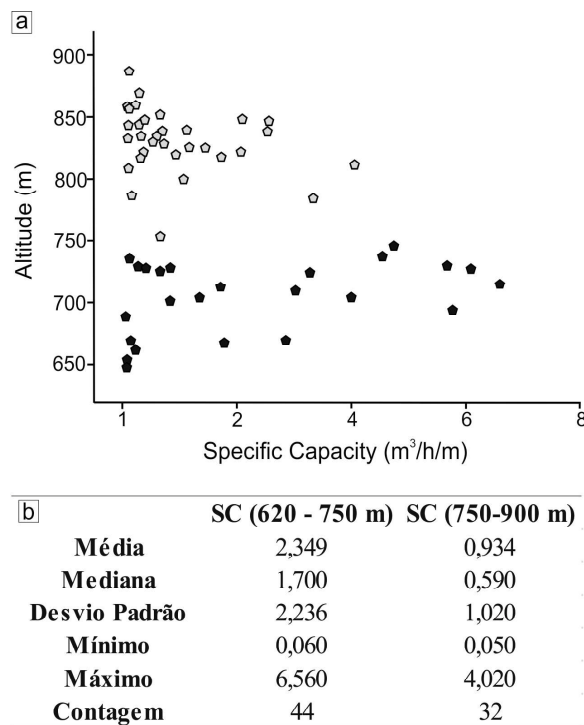


Figura 8 - Correlação entre altitude (m) e a capacidade específica de poços tubulares ( $m^3/h/m$ ) para os poços na região. Em cinza poços instalados em altitude variando entre 751 e 900 metros; em preto poços instalados em altitude variando de 653 a 750 metros.

As linhas de isotores de  $\delta C^{13}$  em escala regional (Figura 9a) exibiu o rio Santo Antônio como principal área de descarga para o sistema aquífero em estudo. As águas nessa zona possuem valores menos depletados de  $\delta C^{13}$ , devido ao maior tempo de residência e consequente dissolução da rocha. Todavia, o fluxo subterrâneo pode ter pouca, ou nenhuma, continuidade lateral, sendo limitado preferencialmente em três zonas: (i) Sistema riacho das Almas – Cão - Talhão; (ii) Sistema riacho Água de Rega – Lapa Doce; e (iii) Sistema riacho São José – Gruta José Antônio - Pratinha. Essa interpretação baseou-se no padrão de dispersão e evolução dos isotores do isótopo estável do carbono, que apresentou valores mais depletados em zonas de recarga distintas, evoluindo de forma desigual, para teores mais positivos em zonas de descarga distintas.

A distribuição espacial do sulfato ( $SO_4^-$ ) (Figura

9b) demonstrou um aumento na isoconcentração desse elemento de Oeste para Leste. Evidenciando, de maneira geral, poços com maior capacidade específica sobre o domínio de elevada concentração de  $SO_4^-$ , corroborando com a importância da dissolução hipogênica no modelado. As áreas de elevada concentração de sulfato coincidem ainda com o sistema, aqui defendido, como riacho São José – Gruta José Antônio – Pratinha, principal exutório do sistema hídrico subterrâneo, com vazão média, avaliada no período entre julho/02 e setembro/03 (VALLE, 2004), na ordem de  $0,821 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta zona corrobora com domínios de elevados valores de transmissividades, maiores que  $1.500 \text{ (m}^2/\text{dia)}$ , colocando-as como o domínio de maior conectividade/transmissividade para os aquíferos cársticos inseridos no contexto da Chapada Diamantina (GONÇALVES, 2017).

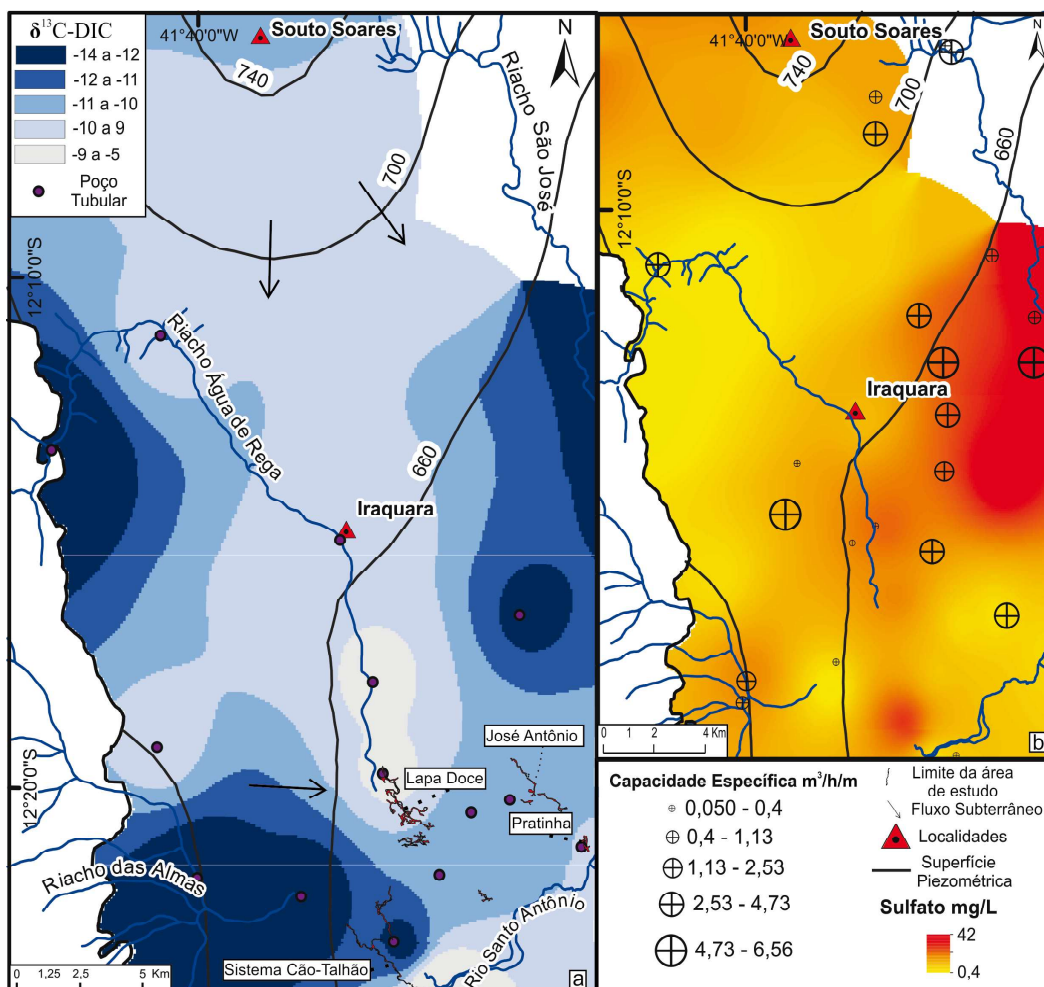


Figura 9 - (a) Linhas de isotores de  $\delta^{13}C-DIC$  para a água subterrânea da porção Sul da Bacia de Irecê, coletadas em julho de 2015. As isolinhas demonstram como principal exutório subterrâneo o rio Sto. Antônio, localizado na região SE da área de estudo; em (b) isotores de sulfato ( $\text{mg/L}$ ), apresentando aumento na concentração de W para E. Os mapas topográficos de cavernas correspondem aos mapas da Lapa Doce, Gruta da Torrinhã, Lapa do Diva, Sistema Cão-Talhão, Gruta da Pratinha, Gruta José Antônio e Gruta Pau dalho, cedidos pelo Grupo Bambuí de Espeologia.

## 5. Considerações finais

A dissolução da rocha carbonática, na porção meridional da Bacia de Irecê, é provavelmente proveniente da coalescência de dois processos de carstificação. O primeiro refere-se à carstificação epigênica, que tende a acentuar-se até a profundidade de 60 m, levando em consideração os dados de capacidade específica em poços tubulares. Esse processo, possivelmente, é responsável por uma maior conectividade hidráulica no intervalo de classe de poços tubulares até a profundidade supracitada. Entretanto, os dados aqui analisados indicam valores mais elevados de capacidade específica no intervalo de classes de profundidades entre 91 e 120 m, sugerindo a formação de cavidades na zona saturada do aquífero. Essa maior conectividade hidráulica nesse intervalo de classe pode estar associada a uma carstificação hipogênica, causada pela hidrólise de sulfetos disseminados na rocha.

Quando correlacionado as feições superficiais do terreno, os dados de capacidade específica em poços tubulares, apresentaram respostas distintas em relação à densidade de lineamentos e de dolinas. Observa-se uma baixa correlação dos dados de capacidade específica em função do mapa de densidade de lineamentos. Por outro lado, a densidade de dolinas apresenta moderada influência nos valores de capacidade específica. Assim, é possível constatar que o arranjo geométrico superficial interfere de forma significativa na capacidade específica de poços tubulares, quando levado em consideração a dispersão de dolinas.

De maneira geral, a superfície piezométrica acompanha a topografia do terreno, no sentido do rio Santo Antônio – principal sistema exotóxico subterrâneo. Entretanto, o fluxo subterrâneo pode ter pouca continuidade lateral, sendo limitado preferencialmente em três sistemas cársticos distintos, a saber: (i) Sistema riacho das Almas – Cão - Talhão; (ii) Sistema riacho Água de Rega – Lapa Doce; e (iii) Sistema riacho São José – Gruta José Antônio - Pratinha.

A compreensão dos fatores morfológicos que condicionam a evolução hidrogeológica é uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em modelados carsticos. Nesse trabalho são reconhecidas duas zonas de maior produtividade no aquífero: (i) até 60 metros de profundidade; e (ii) em profundidade variando entre 91 – 120 metros. Outro fator importante a destacar é que poços perfurados em

baixas altitudes tendem a ser mais produtivos que poços perfurados em locais mais elevados.

A evolução de um sistema cárstico é intrínseco a combinação de diversos fatores, como: clima, tectônica, litologia, abrasão e processo de dissolução. O estudo geométrico superficial é um dos principais recursos para o entendimento do sistema hidrogeológico.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. Ao Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas pelos mapas de cavernas cedidos para a realização dessa pesquisa. À Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia. Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – NEHMA e seus participantes. Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento das pesquisas.

## Referências Bibliográficas

- AUDRA F.; HOBLEA, F., BIGOT, J; e NOBECOURT, J. The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis study of a hypogenic sulfidic cave in aux – lee – baiaans, France. **Acta carsologica**, n 36/2, p. 185–194. 2007.
- AULER, A. S.; FARRANT, A.R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. **Univer. Britl Speloca**. Soc. n 20, p. 187-200. 1996.
- AULER, A. S.; SMART, P. L. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid northeastern Brasil. **Erath Surface Processes and Landforms**. n 28, p. 157-168. 2003.
- ASTER GDEM. ASTER global DEM. **METI & NASA**, 2009.
- BARRETO E. A. S. Reconstituição da pluviosidade da Chapada Diamantina (BA) durante o quaternário tardio através de registros isotópicos (O e C) em estalagmites. Dissertação de mestrado. **Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP**. 2010.
- BASTOS-LEAL L.R., LIMA O.A.L., LUZ J. A.G., RIBEIRO S.H.S.; SILVA A.B. Caracterização hidrogeológica da bacia do rio Salitre, região centro-norte do estado da Bahia. In: **Encontro Brasileiro de Estudo do Carste**, Belo Horizonte, Anais, v.1, p. 60-60. 2004.

- BICHUETTE M. E.; RANTIN B., HINGST-ZAHER E.; TRAJANO E. Geometric morphometrics throws light on evolution of the subterranean catfish *Rhamdiopsis krugi* (Teleostei: Siluriformes: Heptapteridae) in eastern Brazil. **Biological Journal of the Linnean Society**, n 114, p. 136-151. 2015.
- BOMFIM L. F. C., ROCHAA. J. D., PEDREIRAA. J., MORAIS FILHO J. C., GUIMARÃES J. T., TESCH N. A. Projeto Bacia de Irecê. **Relatório final. CPRM**. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM. 2003.
- CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. Standard methods for the examination of water and wastewater. **American Public Health Association**, Washington. N 20, p. 1325, 1998.
- CRUZ JUNIOR. Aspectos geomorfológicos e geoespeleologia do carte da região de Iraquara, Centro-Norte da Chapada Diamantina, Estado de Bahia. Dissertação de mestrado. **Universidade de São Paulo**. 1998.
- ENNES-SILVA, R. A.; BEZERRA F.H.R.; NOGUEIRA F. C.C.; KLIMCHOUK F. B.; CAZARIN A.C. L., AULER A. S. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. **Tectonophysics**, n 666, p. 244–259. 2015.
- CPRM/CBPM. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia – Sistema de Informações Geográficas – SIG, escala 1:1.000.000, 2003.
- FARRAH N. Al; CAMP M. V.; Walraevens Kristine. Deducing transmissivity from specific capacity in the heterogeneous upper aquifer system of Jifarah Plain, NW-Libya. **Journal of African Earth Sciences**, n 85, p. 12–21. 2013.
- FLOREA, j, I. Carbon flux and landscape evolution in epigenic karst aquifers modeled from geochemical mass balance. **Earth Surface Processes and Landforms**. Vol. 40, pags 1072 – 1087. 2015.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. Karst Hydrogeology and Geomorphology. **Wiley, Geography**. Second Edition, p. 562. 2007.
- GUERRA; A. M. Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Bahia. **Tese de Doutorado. Programa de Geologia de Aplicação – USP**. 1986.
- IBGE/SEI. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. 2013.
- KLIMECHOUK A.; AULER, A. S.; BEZERRA, F.H.R.; CAZARIM, C. L.; BALSAMO, F.; BUBYANSKY Y. Hypogenic Origen and Geologic Controls and Fractional Organization of a Giant Cave System im Precambrian Carbonates, Brasil. **Geomorphology**, volume 253, p. 358 – 405. 2016.
- GONÇALVES, T. S. Modelos Quantitativos para Estimativa da Transmissividade no Aquífero Salitre na Região de Irecê – Ba, Brasil. Dissertação de Mestrado. **Programa de Pós Graduação em Geologia - UFBA**. 2017.
- KOLEINI M., ROOY J. L. V., BUMBY A.; Hypogenic Karstification and Conduit System Controlling by Tectonic Pattern in Foundation Rocks of the Salman Farsi Dam in South-Western Iran. **International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering** Vol:7, No:5, 2013.
- LAUREANO, F. V.; KARMANN I., GRANGER D. E.; AULER, A. S.; ALMEIDA R. P.; CRUZ F. W.; STRÍCKS N. M.; NOVELLO V. F. Two million years of river and cave aggradation in NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution. **Geomorphology**, n 273: p. 63–77. 2016.
- MCCOY K. J.; KOZAR M. D. Use of sinkhole and specific capacity distributions to assess vertical gradients in a karst aquifer. **Environmental Geology**, n 54, p. 921–935. 2008.
- MISI, A. Grupo Bambuí no Estado da Bahia. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia**. Salvador SME/CPRM. V1, 119-154, 1979.
- MOOK, W. G. e VRIES, J. J. **International Agency of Atomic Energy**. Vol. 1.2001.
- NEGRÃO, F. I. Caracterização Hidrogeoquímica e vulnerabilidade do Sistema Cárstico da Região de Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. **Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo**. 1986.
- PALMER, A.N. Distinction Between Epigenic and Hypogenic maze Caves. **Geomorphology**, n 134, p. 9–22. 2011.
- PARKURST, 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.
- PEDREIRA A.J. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, **Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo**.2004.
- PEDREIRA A.J., ROCHA A.J.D., COSTA I.V.G., MORAES FILHO, J.C. **Projeto Bacia de Irecê II**. Relatório final. Salvador: CPRM. 1987.



- RAMOS S. O.; ARAÚJO H. A.; BASTOS LEAL L. R.; LUZ J. A. G.; DUTTON A. R. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. **Revista Brasileira de Geociências**, n 34, p. 227-233. 2007.
- SALVATI, R; SASOWKY, I. D. Development of Colapse Sinkholes in Áreas Of Graundwater Discharge. **Journal of Hidrology**, n 264, p. 1-11.2002.
- SOUZA, S. L., BRITO, P. C. R., SILVA, R. W. S. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: **CBPM**.1993.
- SOUZA S.L., TOLEDO L.A.A., BRITO P.C.R., FRÓES R.J.B.; SILVA R.W.S. Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM. **Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral**, Textos, v. 1, 110 p. 2002.
- TAM V. T.; SMEDT F. de; BATELAAN O.; Dassargues A. Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam, v 12, p. 662–673. **Hydrogeology Journal**. 2004.
- VALLE, M. A. Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias De Irecê E Salitre): um Exemplo da Ação de Ácido Sulfúrico no Sistema Cárstico. Tese de Doutorado. **Universidade de São Paulo**. 2004.
- WHITE, W.B. Groundwater Flow In Karstic Aquifers. **The Handbook of Groundwater Engineering**, cap.8, p. 18-36. 1999.
- WHITE, W.B. Karst hydrology: recente developments and open questions. **Engineering Geology**, n 65, p. 85-105. 2002.
- YIDANA S. M.; OPHORI D.; BANOENG-YAKUBO B. Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. **Environmental Geology**, v 56. P. 1213–1223. 2008.