



## Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas

*Hydrogeoclimatic Domains in the Brazilian Semi-Arid, State of Bahia:  
Base Units for Sustainable Management of Groundwater*

Vagney Aparecido Augusto<sup>1</sup>  & José Elói Guimarães Campos<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica (PPGAG), Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

E-mails: [vagney@hotmail.com](mailto:vagney@hotmail.com); [eloi@unb.br](mailto:eloi@unb.br)

### Resumo

A gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos (RHS) no Brasil tem sido feita de forma a negligenciar os aspectos técnicos que favorecem a disponibilidade hídrica. Com a vigência da Lei Federal nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997, conhecida como “Lei das águas”, foi instituído o Plano Nacional de Recursos Hídricos que definiu a bacia hidrográfica como unidade territorial para sua aplicação. Também foi estabelecida a outorga de direito de uso como instrumento de gestão, sendo concedida pelos Estados e União. Consequentemente, a previsão legal tende a gerar conflitos diante da natureza ininterrupta dos fluxos naturais da água em seu ciclo hidrológico. Pois há bacias hidrográficas que não coincidem com os limites das bacias hidrogeológicas. Assim, outorgas estaduais podem afetar usos em estados circunvizinhos, usos de águas superficiais interdependentes, dentre outros. A solução deste tipo de problema passa por diferentes temas e esferas, por isso é essencial que a gestão dos RHS seja embasada por parâmetros técnicos. O objetivo deste trabalho foi identificar as condicionantes técnicas para embasar o gerenciamento dos RHS. Assim, a partir de um estudo hidrogeológico no semiárido brasileiro, foi proposta a definição inédita de Domínios Hidrogeoclimáticos como unidade territorial de referência para gestão dos RHS. Com base na integração de dados multidisciplinares e análises via sistema de informações geográficas, foram propostos cinco domínios. Cada domínio indica os atributos hidrogeoclimáticos orientativos para o gerenciamento dos RHS.

**Palavras-chave:** Aquíferos; Outorgas de direito de uso; Análises multidisciplinares

### Abstract

The management of Groundwater Resources (GWR) in Brazil has been carried out negligently, mainly regarding the technical aspects that favor the water availability. With the Water's Law (Federal Law No. 9.433, 1997), the National Water Resources Plan was established, and the watersheds were defined as a territorial unit for its application. It also established the granting of use rights as a management tool, with the granting process accomplished by both the States and the Union spheres. Consequently, the legal definition does favor conflicts, given the uninterrupted natural water flows in the hydrological cycle. Many watersheds do not coincide with the boundaries of hydrogeological basins. Thus, State grants may affect uses in other surrounding States, users of interdependent surface water, and others. Solutions to these problems go through different spheres, but it is essential to consider technical parameters. The objective of this work was to identify the technical constraints to support sustainable management. From a hydrogeological study in the Brazilian Semi-Arid region, the new definition of 'Hydrogeoclimatic Domains' as territorial reference units for GWR management was proposed. Based on the integration of multidisciplinary data and analyzes through the geographic information system, five domains were proposed. Each domain indicates the hydrogeoclimatic attributes to guide GWR management.

**Keywords:** Aquifers; Granting of water use rights, Multidisciplinary analysis

## 1 Introdução

Conforme legislação vigente no Brasil desde 1997 (Brasil, 1997), a outorga do direito de uso de recursos hídricos é um instrumento legal, de controle administrativo, previsto na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), inciso III do artº 5º da Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (Brasil, 1997). Esta lei definiu no inciso V do artº 1º que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para aplicação da PNRH, meio pelo qual se faz a gestão dos recursos hídricos. No entanto, as águas subterrâneas, que correspondem a uma parte importante dos recursos hídricos, ocorrem em bacias hidrogeológicas cujos limites, em muitos casos, não coincidem com os das bacias hidrográficas (Arraes & Campos, 2007; Arraes, 2008). O grande problema dessa definição legal está no fato de que os RHS se encontram disponíveis em aquíferos muitas vezes regionais que ultrapassam os limites das bacias hidrográficas e os limites estaduais (Arraes & Campos, 2007; Arraes, 2008).

Na Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988), ficou definido que as águas subterrâneas são de domínio dos estados, enquanto as águas superficiais são de domínio da União ou dos estados. Nesse sentido, é natural a possibilidade de haver conflitos nos múltiplos usos das águas em suas diferentes formas de ocorrência (Rebouças, 2002), pois, em muitos casos, as águas superficiais e subterrâneas são interdependentes, com variações sazonais de recargas subterrâneas que mantêm as vazões superficiais em períodos não chuvosos ou vice-versa. Com isso, faz-se necessário, que cada estado defina parâmetros técnicos sustentáveis para determinação de vazões outorgáveis em mananciais superficiais e subterrâneos, uma vez que as suas características de armazenamento, circulação e disponibilidade ocorrem de modos distintos no espaço e no tempo e possuem impactos mútuos entre esses dois recursos.

Neste contexto, o gerenciamento dos recursos hídricos demanda embasamento técnico para permitir que as outorgas (previstas em lei) ocorram de modo sustentável, viabilizando e garantindo o uso equilibrado e a sua preservação (segurança hídrica). Apesar da PNRH ter sido estabelecida em 1997, a maioria dos estados brasileiros ainda não possui uma legislação específica para águas subterrâneas (Pontes *et al.*, 2007). Os atuais critérios usados para emissão de outorgas fundamentam-se em limites mínimos de disponibilidade, os quais são baseados em vazões históricas, essencialmente aplicáveis para águas superficiais. Para águas subterrâneas, em sua maioria, não há critérios ou, em alguns casos, exigem-se parâmetros característicos de poços que refletem propriedades de fluxos locais e não representam as condições dos aquíferos, em termos de recargas e sustentabilidade.

No semiárido brasileiro, região carente de recursos hídricos superficiais, em especial o Estado da Bahia, o mais populoso do semiárido com aproximadamente 15 milhões habitantes (IBGE, 2018), população superior a de Portugal (10 milhões, Pordata, 2019), ainda não conta com critérios técnicos para emissão de outorgas e gestão sustentável dos RHS (INEMA, 2018). O uso indiscriminado e a falta de controle adequado dos RHS ampliam o risco da disponibilidade hídrica subterrânea e da perenidade de rios, lagos, e reservatórios para geração de energia elétrica. Fato ainda mais agravado na Bahia, onde as reservas hídricas superficiais dependem fortemente dos reservatórios subterrâneos que os mantêm perenes nos meses de estiagem.

A solução para o problema é complexa e passa por muitas esferas de atuação. Sendo assim, o aspecto que não pode ser omitido em nenhuma hipótese é o conhecimento técnico. Diante disto, neste estudo, pretende-se identificar qual é a unidade territorial base adequada para gestão das águas subterrâneas e suas condicionantes técnicas minimamente necessárias para embasar o gerenciamento dos RHS de maneira sustentável. Gerenciamento sustentável é definido aqui como a gestão e uso de águas subterrâneas de forma que possam ser mantidas durante o horizonte de planejamento, aplicação e operação de projetos sem causar resultados indesejáveis, ou seja, redução sistemática dos níveis das águas subterrâneas com depleção significativa, reduções nas condições de armazenamento de águas subterrâneas, intrusão de água salgada, degradação da qualidade da água, subsidência de terrenos e depleção da vazão de água superficial afetando negativamente os usuários. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta técnica (Figura 1) que, a partir da definição e inserção de conceitos técnicos multidisciplinares, poderá embasar uma gestão sustentável das águas subterrâneas na porção central do estado da Bahia.

## 2 Área de Estudo

Visando a validação da proposta técnica aqui apresentada para gestão dos RHS, foi definida a região central do estado da Bahia como área para estudo de caso, região conhecida como Chapada Diamantina, incluindo o Parque Nacional Chapada da Diamantina e entorno (Figura 2). Essa região representa diferentes características em termos de geologia, clima, relevo, hidrologia superficial, vegetação e solos (Carvalho & Ramos Barreto, 2010; CBPM, 2015), e reflete em escala regional, a complexidade necessária para validar a proposta e quiçá estender sua aplicação para o restante do estado ou até mesmo para o restante do país. Assim, toda região foi tratada como laboratório para simular e atestar a proposição técnica.

A seleção da área foi embasada em critérios de variabilidade geológica, climática, relevo e em relevância social. Consiste na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu, que abastece mais de 3,2 milhões de pessoas, incluindo 60% da capital Salvador (população 2,85 milhões em 2018, IBGE, 2018). Ademais, a região possui relevância agrícola regional e apresenta conflitos no uso da água entre produtores irrigantes, industriais, usos para lazer e turismo e abastecimento público. Portanto, a região possui forte dependência dos RHS, tornando os estudos técnicos relevantes na busca soluções para gestão sustentável desses recursos.

### 3 Materiais e Métodos

O trabalho foi desenvolvido por meio de amplo levantamento bibliográfico sobre os aspectos legais e critérios técnicos para gestão dos RHS no Brasil. Foi dada ênfase à composição de banco de dados espaciais integrados com dados geológicos, pedológicos, topográficos, pluviométricos, de poços, através de pesquisa na base do Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM (CPRM/SGB, 2009), e de estudos hidrogeológicos, geomorfológicos e estruturais. Também foram realizadas atividades em campo. A partir desse conjunto de dados, foi efetuada a integração dos mesmos em ambiente de sistema de informações geográficas (SIG) e geração de mapas temáticos. Por meio de análises técnicas e álgebra de mapas (integração, sobreposição, correlação, interpolação, interpretação), foi possível avaliar as potencialidades e condicionantes dos aquíferos e seus sistemas, as condições de recarga, as dependências climáticas e a relação com o sistema hídrico superficial.

Com base na análise técnica e na interpretação dos dados integrados e interrelacionados de forma geográfica e multidisciplinar, foi então elaborada a proposta técnica que se constitui no principal resultado deste estudo. Esta pesquisa teve, como premissa, a busca de uma base mínima e simples para viabilizar o gerenciamento dos RHS de forma sustentável. O fluxograma simplificado (Figura 1) apresenta as etapas do estudo desenvolvido. A base de dados utilizada incluiu:

- Dados topográficos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros (Farr *et al.*, 2007), obtidos via *download* do *website* Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2017);
- Mapa geológico do estado da Bahia, escala de 1:1.000.000 (Dalton de Souza *et al.*, 2003);
- Imagens de satélite de alta resolução especial, disponível no programa Google Earth Pro (GOOGLE EARTH, 2018);

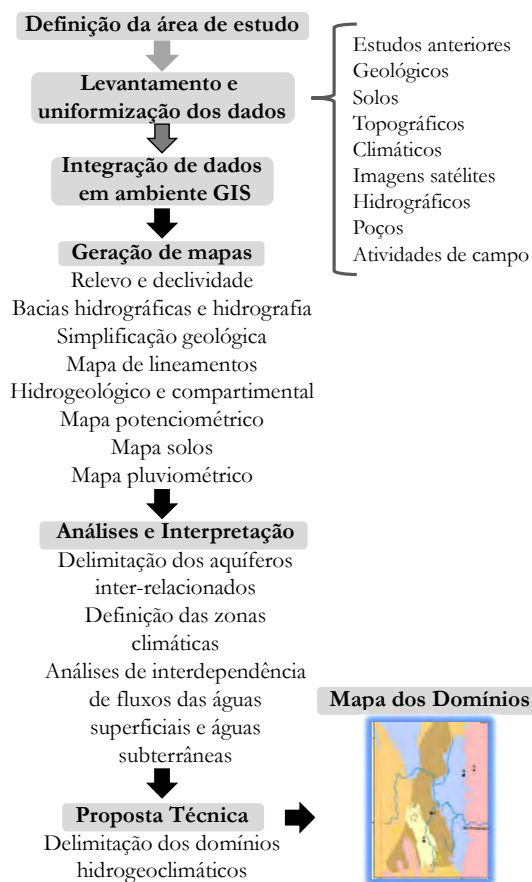


Figura 1 Fluxograma simplificado com as principais etapas de trabalho desenvolvidas.

- Mapa de solos do estado da Bahia, escala de 1:1.000.000 (Jacomine *et al.*, 1977), e Santos *et al.* (2011);
- Dados pluviométricos do Atlas Pluviométrico do Brasil (Pinto *et al.*, 2011);
- Dados das estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA);
- Dados hidrográficos da Hidroweb (ANA); e,
- Dados de poços tubulares do SIAGAS (CPRM).

### 4 Resultados e Discussões

Como principal resultado desse estudo, a proposta técnica aqui apresentada reflete várias análises multidisciplinares que culminaram na definição da condição inicial mínima e necessária para gestão sustentável dos RHS. Assim, foi definido que os Domínios Hidrogeoclimáticos (DHGC) devem ser a unidade territorial de referência para

planejamento e gestão desses recursos. Ou seja, os Planos de Recursos Hídricos devem considerar, como premissa para planejamento e aplicação do PNRH, os aspectos técnicos e as áreas geográficas delimitadas pelos DHGC.

Para um melhor entendimento da proposta, segue a frente a definição técnica do termo DHGC, sua aplicação, e, por fim, as análises consequentes. O texto dos resultados e as discussões se apresentam de forma propositiva e estão organizados com metodologia e aplicação da proposta em estudo de caso.

#### 4.1 Definição de Domínios Hidrogeoclimáticos

O termo proposto, “domínio hidrogeoclimático”, é uma denominação inédita na literatura e visa descrever e representar o agrupamento de áreas com características heterogêneas dos ambientes, porém, com propriedades físicas e químicas consideradas determinantes para o controle natural das disponibilidades RHS, considerando os aspectos de quantidade e qualidade das águas subterrâneas, no ambiente e no tempo. Em outras palavras, as águas subterrâneas destes domínios, assim como sua qualidade/quantidade, são resultantes da interação conjunta de características ambientais que favorecem a sua disponibilidade no espaço e no tempo. O termo é composto primeiramente pela palavra “domínio”, que aqui visa representar uma área geográfica ou um agrupamento de áreas que refletem um sistema interdependente em seus aspectos de funcionamento hídrico. O segundo termo é composto por três radicais. O primeiro termo “hidro” representa as características hidrológicas superficiais, os fluxos das águas superficiais e toda a dinâmica no ambiente superficial. O radical “geo” remete as características geológicas e hidrogeológicas inerentes da área, considerando os aspectos físicos e químicos das águas subterrâneas no tempo e espaço, seus fluxos, condições de recarga, disponibilidade, distribuição, forma de ocorrência, gêneses e qualidade. Por fim, o termo climático, como já é conhecido, remete aos aspectos de padrões e condições atmosféricas que caracterizam uma região em termos de variações pluviométricas, umidade, temperatura e suas intensidades ao longo de tempo. Esses três termos integrados consolidam os aspectos físicos e químicos determinantes que favorecem a disponibilidade das águas subterrâneas em uma determinada área, tanto em termos de quantidade e qualidade quanto em termos de variabilidade temporal e espacial.

A proposição do termo “hidrogeoclimático” também tem como objetivo a simplificação descritiva dos fenômenos naturais que levam à disponibilidade e sustentabilidade das águas subterrâneas nos diferentes ambientes e climas no tempo. Esta simplificação também visa facilitar a gestão dos RHS, que depende de múltiplos e variáveis aspectos

ambientais. Com isso, é possível criar critérios técnicos de outorgas específicos para os DHGC, evitando usar parâmetros pontuais (propriedades de poços etc.).

##### 4.1.1. Delimitação dos Domínios Hidrogeoclimáticos

A delimitação geográfica dos domínios visa agrupar as áreas afins constituídas pelos principais atributos hidrogeoclimáticos que nortearão a gestão dos RHS. Os atributos permitem caracterizar, delimitar e agrupar os aquíferos (ou conjunto de aquíferos) que tenham propriedades hidrogeológicas similares, os quais, por sua vez, associados aos aspectos climáticos e de hidrologia superficial condicionam a delimitação do DHGC de interesse. O DHGC é visualizado e projetado em áreas na superfície para fins de gestão, porém, sua natureza deve refletir os aspectos dos aquíferos (reservatórios), do clima (fonte hídrica) e da interface entre esses sistemas. Assim, o DHGC traz, em sua essência, o conceito de interdependência entre esses três sistemas ambientais (hidrogeologia, hidrologia superficial e clima). É essa interdependência sistêmica que garantirá a disponibilidade dos RHS em termos de quantidade/qualidade no espaço e no tempo.

Na delimitação dos DHGC, o primeiro aspecto a ser considerado são características dos reservatórios (dos aquíferos), ou seja, devem ser desenvolvidos estudos hidrogeológicos/geológicos regionais para caracterização e definição das condições de armazenamento e fluxos subterrâneos, assim como os demais fatores intrínsecos de qualidade das águas e de intercâmbios das águas subterrâneas e superficiais. O segundo aspecto a ser considerado são os fatores naturais que ciclicamente mantêm os aquíferos, ou seja, os aspectos climáticos locais/regionais. Todos os parâmetros e variáveis climáticas relevantes devem ser considerados para disponibilidade hídrica na área de interesse (pluviosidade, temperatura e umidade). Além disso, a análise dos aspectos climáticos com conhecimento prévio do arcabouço hidrogeológico pode facilitar delimitação dos DHGC.

O terceiro aspecto a ser considerado será a interface entre os dois sistemas anteriores, isto é, sistemas hidrogeológicos e climáticos. Ou seja, os aspectos intervenientes da hidrologia superficial, incluindo relevo, fluxo superficial, solos, uso e ocupação e interrelação das águas superficiais/subterrâneas. Visando simplificação no processo de gestão, deve-se ponderar os aspectos técnicos da hidrologia superficial mais relevantes e imprescindíveis, seja por impactos positivos ou negativos sobre funcionamento dos aquíferos. Isso facilitará também a etapa de monitoramento, com menor número de variáveis de acompanhamento no dia-a-dia.

Importante citar que cada região pode apresentar necessidades e aspectos diferentes para definição de DHGC. A necessidade de individualização de domínios pode variar em termos de escala, de acordo com atuação da instituição gestora e/ou relevância dos aspectos hidrogeoclimáticos locais/regionais considerados. Em alguns casos, a ordem das análises e a delimitação dos domínios pode ser afetada pela indisponibilidade de dados, relevância e/ou escala dos parâmetros técnicos considerados. O conhecimento prévio da hidrogeologia é fundamental, pois os limites dos aquíferos e suas propriedades norteiam os limites da disponibilidade espacial/volumétrica dos RHS e sua gestão, enquanto os aspectos climáticos e hidrológicos superficiais indicam as disponibilidades hídricas e o uso desses recursos no tempo.

### 4.2 Geologia da Área de Estudo

A área de estudo (Figura 2) está situada sobre o contexto geológico do Cráton São Francisco, que, segundo a conceituação de Almeida (1977), representa um extenso núcleo estabilizado no final do Paleoproterozoico (1.6 bilhões de anos) e é limitado por zonas de rochas deformadas durante o Ciclo Brasileiro (950-490 milhões de anos). Na parte sul e leste da área, ocorrem rochas que compõem o embasamento Arqueano, caracterizado por rochas mais antigas (2.5 bilhões de anos), compostas por ortognaisses, metagranitos, migmatitos, metavulcânicas, rochas ultramáficas e xistos, dentre outras. Próximo à superfície, essas rochas ocorrem de forma alterada formando um regolito de profundidade variável (Silva, 1994).

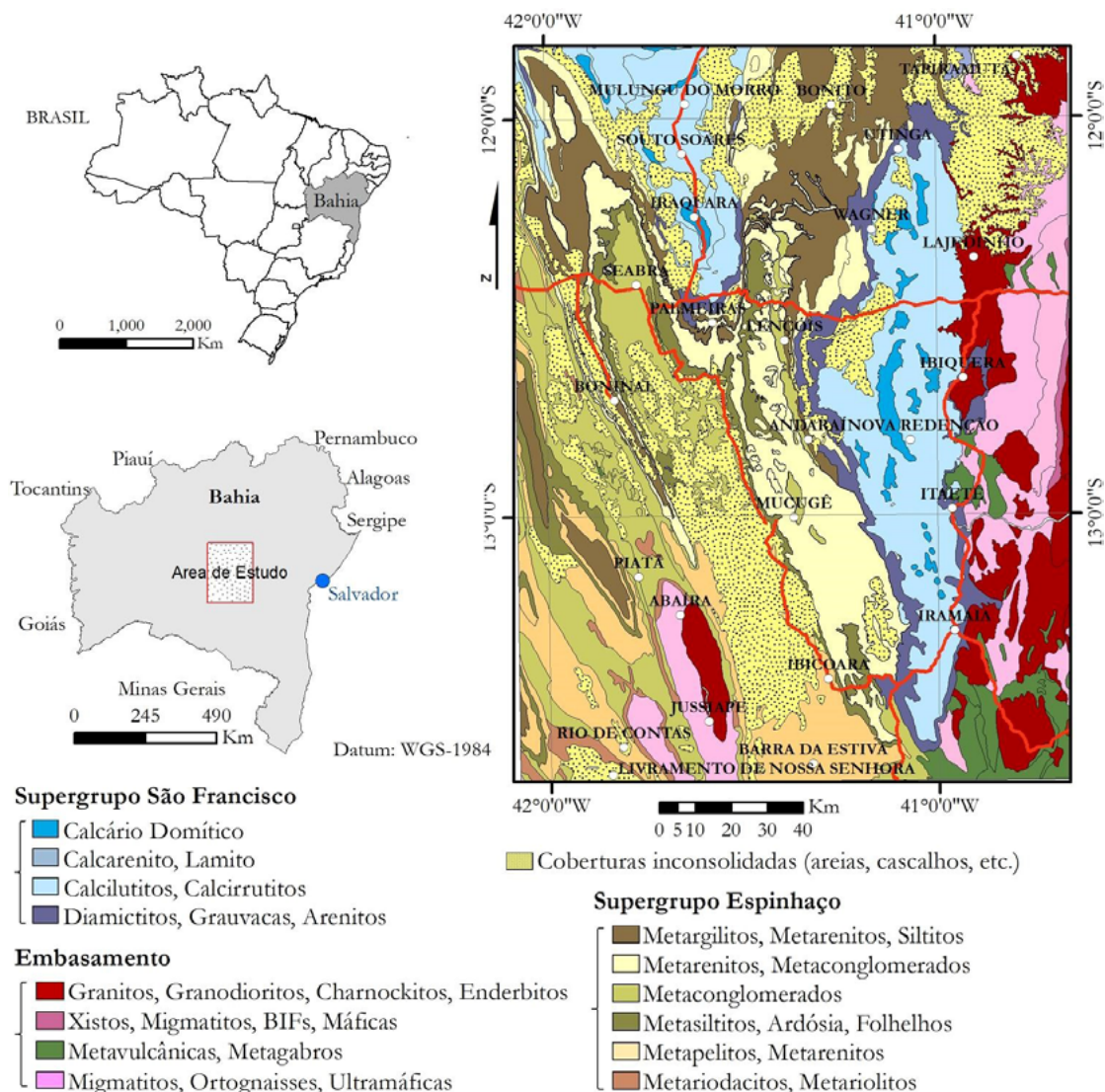


Figura 2 Mapa de localização da área de estudo. A direita observa-se a simplificação geológica da área de estudo que foi baseada no contexto de sobreposição estratigráfica de Silva *et al.* (1994) e Dalton de Souza *et al.* (2003).

Na maior parte da área de estudo, ocorrem rochas metassedimentares deformadas do Supergrupo Espinhaço que sobrepõem as rochas do embasamento. A sucessão Espinhaço é caracterizada por espesso pacote de rochas metassedimentares de idade paleoproterozoica e é composto por três agrupamentos rochosos. O primeiro, na base, é composto por metavulcânicas (metariodacito, brechas vulcânicas, metariolitos e tufitos), seguido por uma sequência de metapelitos, metarenitos, metassiltitos, ardósias e metaconglomerados, todas com diversas intercalações entre si, apresentando diversas formas de contato e estruturação sedimentar. No topo do Espinhaço, ocorre uma sequência metassedimentar com metaconglomerados, metarenitos e metargilitos, com predominância de metarenitos (Figura 2).

Estratigraficamente acima da Supergrupo Espinhaço, ocorre parte do Supergrupo São Francisco, incluindo-se as Formações Bebedouro (com idade de 900 milhões de anos) e Salitre (com idade de 767 milhões de anos). Ambas as formações compõem as bacias sedimentares do Irecê, Una-Utinga e Salitre, com sedimentos terrígenos-carbonáticos (Macedo & Bonhomme, 1984). Essas ocorrências estão representadas por rochas terrígenas na base (Formação Bebedouro), compostas por diamictitos, grauvacas, lamitos e arenitos intercalados e interdigitados. No topo, encontram-se as rochas carbonáticas da Formação Salitre, com intercalações de pelito com calcilitos, calcirutidos, calcarenitos e dolomitos (Silva, 1994). Além dessas litologias, ocorrem, em diversas partes da área, coberturas de sedimentos inconsolidados, tipicamente representados por pacote arenoso com cascalhos, argilas, siltes e lateritas ferruginosas.

Em termos estruturais/deformacionais, de uma maneira geral, todas as rochas na área de estudo estão significativamente deformadas, apresentando dobramentos, falhas e fraturas de diversas intensidades. O embasamento apresenta a maior sobreposição de registros deformacionais e, conseqüentemente, maior variabilidade direcional de lineamentos que ocorrem preferencialmente nas direções NW-SE, N-S, NE-SW e alguns E-W.

O Supergrupo Espinhaço, pela sua natureza metassedimentar e em decorrência dos processos deformacionais, mostra-se intensamente fraturado, com dobramentos e falhas regionais, com rejeitos significativos. Esses lineamentos predominam na direção N-S, com variações para NW-SE, NE-SW e, secundariamente, E-W. Devido aos dobramentos e às características reológicas dos metassedimentos, observa-se grande densidade de fraturas verticais nas formações do Grupo Espinhaço. Trata-se de fraturas extensivas, com aberturas de dimensões métricas/centimétricas que vão a dezenas/centenas de metros.

As rochas do Supergrupo São Francisco também estão fraturadas, porém, mostram-se menos deformadas. A Formação Bebedouro ocorre nas bordas e na base das bacias

carbonáticas, com típicos fraturamentos de acomodação estrutural rúptil. Essa estruturação também se aplica a Formação Salitre, com exceção na Bacia do Irecê, onde estão dobradas com cavalgamentos para sul. Essas rochas carbonáticas estão recobertas por espessos regolitos, que se acomodam, e dificultam observação dos sinais estruturais no relevo. Porém, os aspectos intrínsecos de dissolução carbonática dessas rochas condicionam acomodações estruturais (queda de blocos etc.) que alteram o relevo e as diferenciam regionalmente. Na bacia Una-Utinga os registros de lineamentos regionais, soerguimentos e acomodação de blocos refletem a estruturação de sua base (Supergrupo Espinhaço e embasamento).

De forma sintética, a área de estudo mostra a presença de quatro zonas estruturais distintas: a) o embasamento, com alta variabilidade direcional e alta densidade de lineamentos; b) o Espinhaço, intensamente fraturado nas direções NW-SE e N-S e com reflexos de fraturamento vertical intenso devido aos dobramentos; c) as bacias terrígeno-carbonáticas menos deformadas, com menor densidade de lineamentos, mas com acomodação de blocos e dolinamentos; e, d) as áreas de coberturas recentes, com poucas drenagens orientadas por lineamentos regionais (Figura 3).

A partir do mapa de densidade de lineamentos, nota-se que os lineamentos estão mais concentrados nos metassedimentos do Grupo Espinhaço, seguindo preferencialmente as direções N-S e NW-SE. O embasamento também apresenta densidade alta de lineamentos, porém, com direções variáveis e com relevo mais arrasado. As coberturas recentes sotopostas mascaram a identificação dos lineamentos, porém, suas drenagens seguem orientadas pelo contexto deformacional N-S, NW-SE e NE-SW.

### 4.3 Caracterização Hidrolitológica

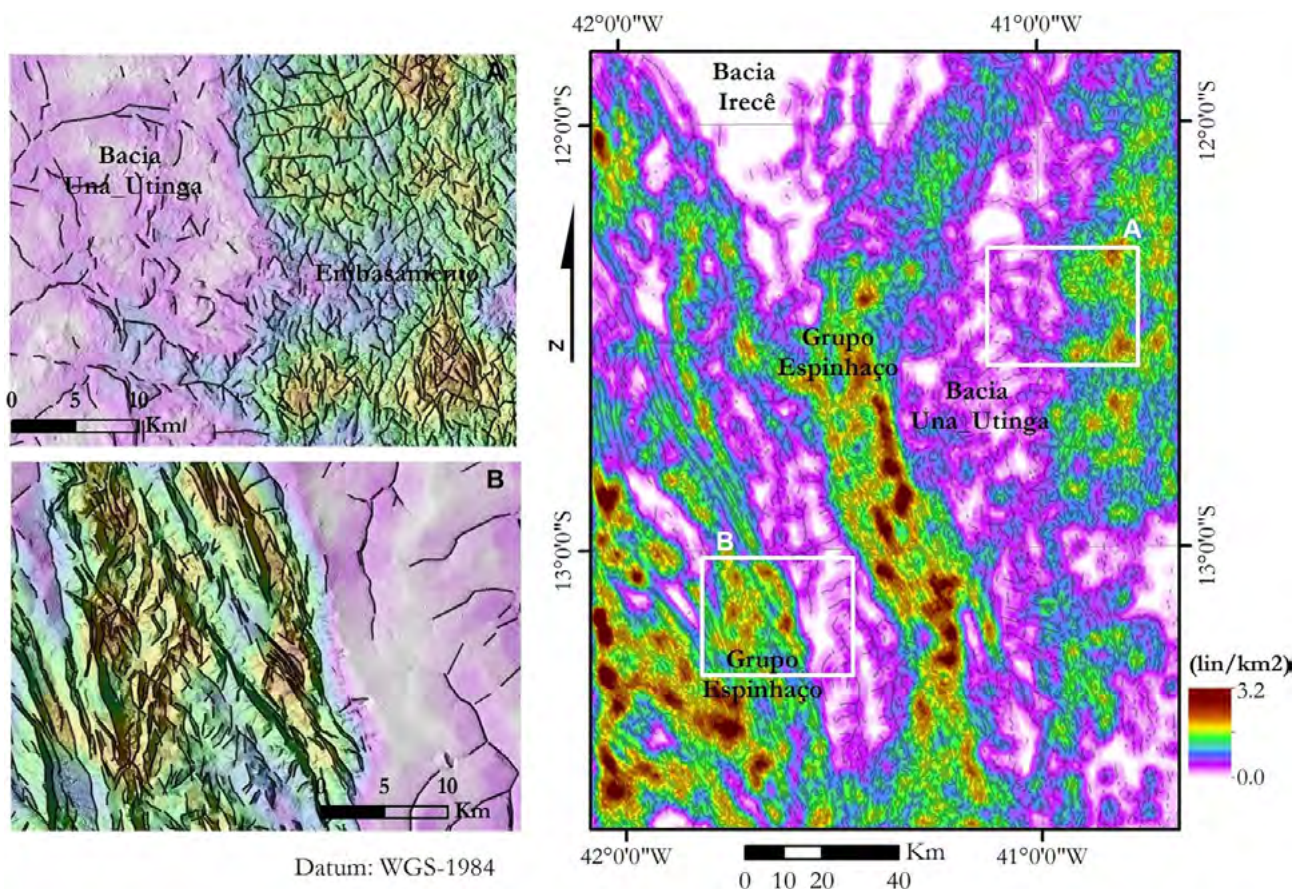
Com base na hidrogeologia, análise geológica estrutural, geomorfologia, dados de poços e etapa de campo, foi possível definir cinco unidades hidrolitológicas para a área de estudo, conforme definição de Diniz *et al.* (2014) (Figura 4). Cada unidade hidrolitológica (aquífero) representa um agrupamento de diferentes tipos de rochas ou unidades geológicas que armazenam e transmitem águas subterrâneas de forma semelhante. Assim, na área de estudo, foi possível distinguir as seguintes unidades:

- a) **Unidade cristalino-fissural ou cristalino-fraturado**, onde o principal meio de armazenamento e fluxo das águas ocorre via sistemas de fraturas, juntas, fendas, falhas e trincas (fissuras) nas rochas. A gênese dessas rochas desfavorece a existência de porosidade intergranular. Nessa unidade, são encontradas as rochas do embasamento antigo (*e.g.*, metagranitos, ortognaisses e migmatitos).

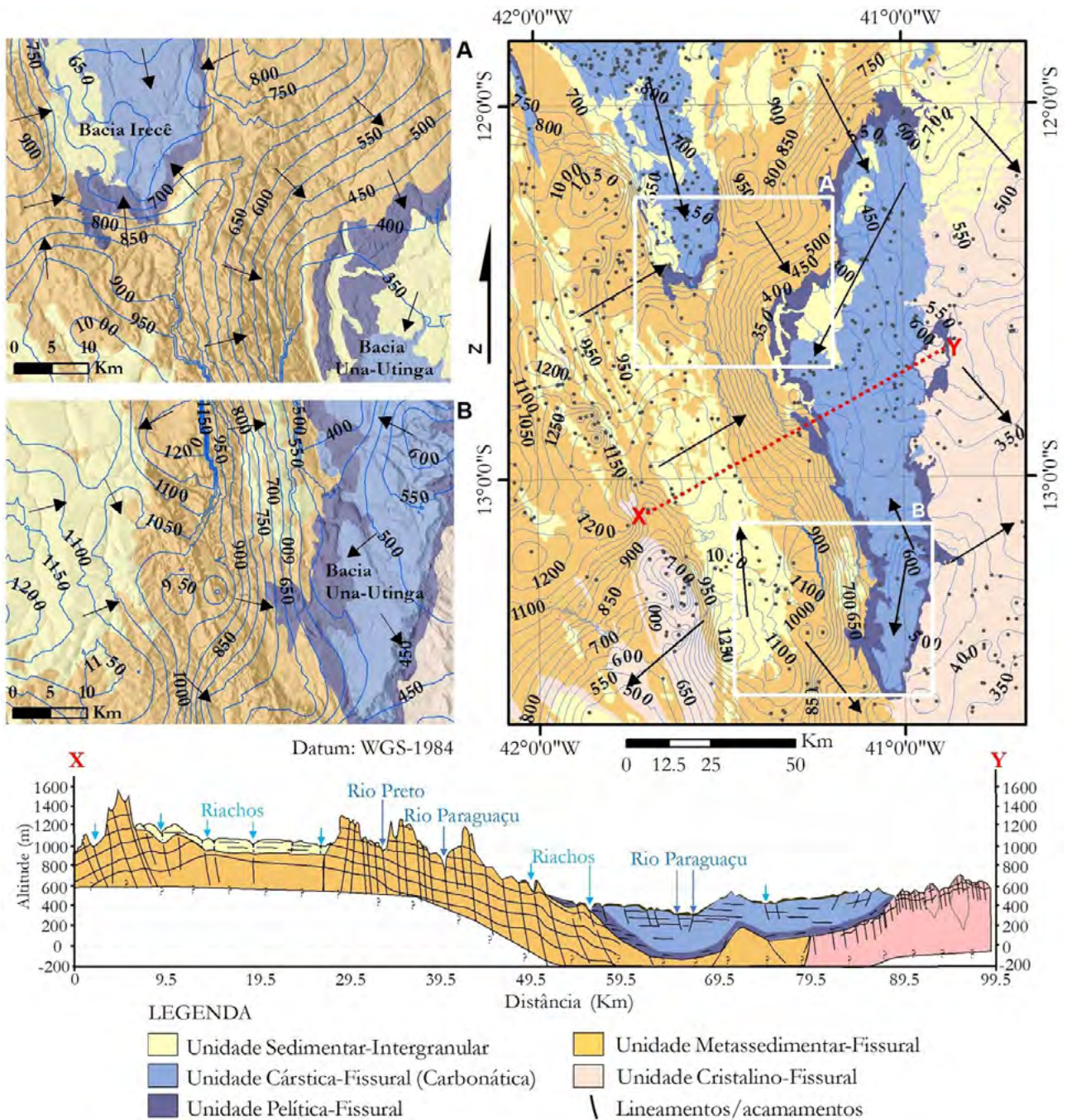
Essa unidade ocorre na parte leste e sul da área, onde se observa um relevo ondulado mais arrasado topograficamente. Essa unidade apresenta alta densidade de lineamentos multidirecionais, os quais são os principais meios de fluxos e conectividade para armazenamento das águas subterrâneas. No geral, o armazenamento de água subterrânea nessa unidade é condicionado pela existência dos lineamentos e suas interconectividades.

**b) Unidade metassedimentar-fissural ou metassedimentar-fraturada**, onde os fluxos e armazenamento das águas ocorrem predominantemente via sistemas de fissuras. Porém, essa unidade se distingue dos aquíferos cristalinos-fraturados devido à natureza deformacional mais friável dos metassedimentos, permitindo uma maior fragmentação e, conseqüentemente, maior densidade e conectividade de fraturas. Associadas ainda a essas fissuras, existem os planos de acamamentos entre os estratos, os quais possibilitam fluxos

paralelos aos acamamentos. Outra característica peculiar dessa unidade é a presença de rochas com porosidade intergranular associadas à variabilidade granulométrica e às intercalações de rochas com porosidades secundárias por todo o Supergrupo Espinhaço, refletindo em ocorrências de aquíferos com dupla porosidade. Essa dupla porosidade resulta em um sistema localmente misto de armazenamento, onde, em determinados locais, há maior disponibilidade hídrica regulada no tempo e, em outros locais, a disponibilidade possui maior variabilidade temporal. Essa característica não é uniforme ao longo da unidade, sendo de difícil delimitação. Associada ao intenso faturamento sub-horizontal, vertical e aos planos de acamamentos, essa unidade constitui-se em um sistema misto, complexo e relevante para o fluxo e armazenamento das águas subterrâneas. Relevante também devido ao alto potencial de recarga natural, pois, na área, geralmente não se apresentam solos de cobertura.



**Figura 3** Mapa de densidade de lineamentos estruturais (nº de lineamentos/km<sup>2</sup>). Em vermelho escuro, observam-se as áreas com maior densidade de lineamentos, as cores claras menores densidades. O recorte A, mostra as diferenças da densidade de lineamentos entre a bacia Una-Utinga e o embasamento. No recorte B, as diferenças entre Grupo Espinhaço e os sedimentos inconsolidados sotopostos.



**Figura 4** Mapa de ocorrência das unidades hidrolitológicas, com sobreposição das isolinhas equipotenciais dos aquíferos. As setas pretas indicam o sentido de fluxo das águas subterrâneas. Os pontos em cinza representam os 695 poços (SIAGAS). No recorte A, observa-se em detalhes a potenciométrica e as diferenças das bacias do Irecê e Una-Utinga desconectadas. No corte B, a unidade sedimentar-intergranular favorece fluxos para as nascentes do rio de Contas, assim como, para a bacia Una-Utinga. Os dados usados foram SRTM e SIAGAS interpolados via *kriging* (ArcMap 10.3).



- c) **Unidade cárstica-fissural**, formada pelas rochas carbonáticas do Supergrupo São Francisco cujas ocorrências formam as bacias Una-Utinga e Irecê. As rochas são representadas por calcários e dolomitos com várias intercalações de margas e materiais pelíticos que favorecem o processo de dissolução carbonática não uniforme, com desenvolvimento de cavidades subterrâneas de dimensões, formas e direções variadas. A principal forma de fluxo e armazenamento das águas subterrâneas ocorre nas fissuras e nas cavidades cársticas, desenvolvidas pela dissolução carbonática. Essa unidade, em termos de lineamentos regionais, se mostra pouco deformada, porém, possui várias fraturas verticais menores que seguem o padrão direcional regional (NW-SE, W-E e N-S). Essa unidade, pela natureza carbonática fissural, representa um reservatório complexo e de difícil mapeamento. Porém, a partir dos lineamentos mapeados, drenagens, dolinas e poços, foi possível identificar zonas mais favoráveis de fluxos subterrâneos
- d) **Unidade pelítica-fissural**, composta por rochas da Formação Bebedouro, dispõe-se acima do embasamento na parte leste da bacia Una-Utinga, sobre Espinhaço na parte oeste e estratigraficamente abaixo dos carbonatos da Formação Salitre que compõe a unidade fissuro-cárstica. Assim, essa unidade forma a base e as bordas das bacias carbonáticas Una-Utinga e Irecê. Sua composição é tipicamente uma alternância de rochas pelíticas (diamictitos, lamitos e filitos) com camadas e lentes de arenitos. Em termos de deformacionais, essas rochas encontram-se bem fraturadas em alguns níveis e maciças e/ou friáveis noutros. No geral, suas camadas seguem o padrão subplanar das bacias com pouca deformação, mas apresentam lineamentos do contexto regional. Os fluxos e o armazenamento das águas subterrâneas ocorrem, principalmente, via sistema fissural associados aos acamamentos com intercalações de dupla porosidade (camadas e lentes de arenitos). Essa unidade tem as condições favoráveis para existência de aquíferos confinados com alternância de camadas maciças (pelíticas) de baixa transmissividade e camadas de arenitos (fragmentadas) com transmissividades mais altas.
- e) **Unidade sedimentar-intergranular**, ocorre de forma irregular e distribuída por toda área, recobre as demais unidades com espessuras variadas, geralmente rasas, de depósitos inconsolidados de areias, cascalhos, siltes e argilas. Essa unidade representa os tipos mais conhecidos de aquíferos, do tipo intergranular livre, onde os fluxos e o armazenamento da água subterrânea ocorrem por

meio da conectividade de espaços vazios entre os grãos (poros interconectados) e possui contato com a atmosfera na superfície freática. Apesar de grande distribuição pela área (Figura 2), em sua maioria, não representam relevância em termos de aquíferos saturados, pois são insaturados. Diante desse fato, optou-se por delimitar como unidade sedimentar-intergranular somente sua maior ocorrência, situada entre as sedes dos municípios de Mucugê, Abaíra, Ibicoara e Barra da Estiva (Figura 2). Nessa região, essa unidade possui espessura de dezenas de metros, com significativa capacidade de reservação de água, boa transmissividade e condutividade hidráulica (Figura 3, recorte B).

#### 4.4 Fluxos Regionais e Interconectividades das Águas

Por meio dos dados de poços e de topografia (SRTM), foi possível obter a superfície potenciométrica para os aquíferos da área. Essa superfície, junto com os dados geológicos estruturais e hidrolitológicos indicam a tendência direcional dos fluxos regionais subterrâneos. Nas unidades hidrolitológicas, onde os fluxos subterrâneos são principalmente controlados por fissuras ou cavidades, a geometria dos fluxos não segue uma superfície potenciométrica uniforme, como em meios porosos, mas sim em zonas preferenciais com altimetrias e geometrias variáveis dentro do reservatório. A superfície potenciométrica interpolada indica padrões regionais e direcionais de fluxos, incluindo os sentidos e as intensidades relativas.

No contexto geral, observa-se que as cinco unidades hidrolitológicas descritas anteriormente têm uma relação de baixa conectividade hidráulica dos fluxos subterrâneos. A unidade metassedimentar-fissural possui lineamentos regionais que conectam todas as unidades, porém, devido a sua espessura, altitude, área de ocorrência e a particularidade de intercamamentos entre rochas metassedimentares, representa uma barreira para fluxos subterrâneos oriundos das demais unidades. Como reflexo das características geológicas e de relevo elevado, essa unidade fornece águas subterrâneas e superficiais para as demais unidades do entorno. O elevado gradiente potenciométrico e a alta densidade de lineamentos que, associados, têm forte potencial para fluxos subterrâneos com conectividade direta para as águas superficiais. Essas características favorecem a existência de drenagens superficiais com maior variabilidade de vazão, irregulares no tempo, seguindo uma relação direta com intensidade e durabilidade das chuvas.

A unidade cárstica-fissural possui duas principais ocorrências dentro da área de estudo e são consideradas

aqui hidráulicamente desconectas entre si. A noroeste da área de estudo, está a bacia do Irecê, desconectada da bacia Una-Utinga (a leste) devido à presença de um alto estrutural de 22 km entre elas (recorte A, Figura 4). As duas áreas apresentam diferenças altimétricas de cerca de 350 m e diferenças potenciométricas de 300 m. A conectividade hidráulica subterrânea entre essas duas áreas é considerada improvável, apesar da existência dos sistemas de lineamentos regionais na direção NW-SE (Figura 3). Dessa forma, essas bacias carbonáticas foram consideradas uma única unidade hidrolitológica devido às suas características hidrogeológicas, entretanto, representam dois reservatórios subterrâneos desconexos e devem ser geridos de forma independentes.

Na unidade cárstica-fissural, a porção sul da bacia Irecê, onde estão suas porções mais baixas da superfície potenciométrica (altimetria de 630 m), está em contato com a unidade pelítica-fissural e metassedimentar-fissural. Assim, os fluxos subterrâneos oriundos da própria unidade e do entorno fluem para essa região, onde percorre, o leito do rio Santo Antônio. Nessa região, há indicativos de que existe extravasamento hídrico da unidade, assim, as águas subterrâneas podem alimentar o rio Santo Antônio. Entretanto, atualmente, por causa do intenso bombeamento e do uso das águas subterrâneas nessa bacia, a superfície potenciométrica encontra-se rebaixada e é possível que o rio Santo Antônio esteja alimentando os aquíferos locais ao invés de receber águas subterrâneas dos aquíferos. Essa mudança pode favorecer a colapso do leito do rio e a interrupção do funcionamento perene deste rio.

A outra parte da unidade cárstica-fissural na área, a bacia Una-Utinga, ocorre integralmente dentro da área de estudo. Os fluxos regionais subterrâneos na região do rio Utinga fluem para sul até parte central da bacia, porções baixas próximas da cidade Andaraí, região do Pantanal Baiano (Pantanal Marimbus). As águas subterrâneas também fluem e alimentam o rio Paraguaçu que cruza essa bacia na parte central (Figura 5). Na região do rio Una, os fluxos possuem sentidos preferenciais para noroeste/leste, com pequena distribuição para sul. O escoamento para sul favorece as nascentes do rio Sincorá, para noroeste favorecem os rios Una e Paraguaçu. Na região central, em tempos de cheias, o rio Paraguaçu alimenta lateralmente os aquíferos locais, fato constatado nas cavernas próximas, como no ponto turístico Poço Azul onde as águas transparentes ficam turvas com os sedimentos finos oriundos das águas superficiais. Um dado relevante na bacia Una-Utinga é o grande gradiente potenciométrico (350 m) existente entre a parte norte e as áreas centrais (Figura 4). Esse gradiente, dentro do contexto estrutural, favorece a geração de fluxos mais rápidos e turbulentos, com dissoluções cársticas mais significativas, gerando cavidades que podem funcionar como rios subterrâneos caudalosos em períodos chuvosos.

Várias cavernas/dolinas já foram mapeadas nessa unidade (Pereira, 1998), com dezenas a centenas de metros em desenvolvimento horizontal. O Poço Encantado (caverna turística) tem 506 metros de desenvolvimento horizontal e 100 metros de desenvolvimento vertical, sendo 60 metros na zona saturada (Pereira, 1998). Assim, essa unidade deve ser tratada com especial cuidado em termos de gestão e uso dessas águas. Os aspectos de favorabilidade dos fluxos subterrâneos podem favorecer grande capacidade produtiva em poços (pontualmente), induzindo cálculos de reservas volumosas, porém, vulneráveis à rápida exaustão, contaminação e outras consequências indesejáveis. As numerosas áreas de dolinamentos são excelentes armadilhas para captação das águas de chuvas, fluxos superficiais (*runoff*), e favorecem a recarga direta dos aquíferos. Com isso, essa unidade é muito favorável à recarga, mesmo com espesso pacote de solos/regolito subjacentes.

A unidade cristalino-fissural ocorre principalmente no leste da área de estudo e possui fluxo condicionado pelas estruturas de forma anisotrópica, mas tem fluxos com tendência para sudeste e leste. Praticamente toda a unidade está vertendo águas subterrâneas para o sentido do rio Paraguaçu. Uma exceção ocorre ao sudoeste da área de estudo, onde essa unidade tem contato direto com a unidade metassedimentar-fissural topograficamente acima e recebe águas das regiões altas com fluxo para sul. Em termos de fluxos regionais, para fins de gestão, essa unidade é desconectada das demais unidades e tem pequena contribuição com fluxos na borda da bacia Una-Utinga, onde seu relevo favorece fluxos de base intermitentes para o interior da bacia.

A unidade pelítica-fissural possui ocorrência restrita às bordas e à base das bacias carbonáticas, e suas condições hidrogeológicas denotam uma unidade mista, com aquíferos porosos, fissurais e de dupla porosidade intercalados. Assim, essa unidade, em termos regionais, funciona como uma barreira semipermeável retardante/isolante dos fluxos regionais oriundos das demais unidades para dentro das bacias carbonáticas. Essa barreira favorece um isolamento e uma diferenciação na qualidade das águas subterrâneas entre esses sistemas hidrolitológicos. Em termos de recargas, essa unidade apresenta baixa favorabilidade em razão da restrita área de ocorrência. Entretanto, ela constitui a base rochosa onde fluem as drenagens perenes da região, o que pode condicionar recargas locais em alguns trechos.

A unidade sedimentar-intergranular é a única que segue o padrão de fluxo da superfície potenciométrica, consequência da natureza do fluxo sub-horizontal intergranular, relativamente homogêneo e isotrópico. Sua ocorrência mapeada é significativa em área e espessura, o que favorece a existência de um importante reservatório subterrâneo livre. Esse reservatório é a base de todas as nascentes afluentes do rio Paraguaçu. Na borda oeste e

sudeste da unidade, os fluxos subterrâneos favorecem as nascentes afluentes do rio de Contas. Com isso, essa unidade tem importante contribuição para a existência e manutenção da perenidade das águas do rio Paraguaçu (e suas barragens) e drenagens menores afluentes do rio de Contas (incluindo nascentes do rio Sincorá), localizadas a sul da área de estudo (Figura 4, recorte B).

#### 4.5 Aspectos Climáticos

Em termos de clima, a região de estudo está situada integralmente dentro do contexto legal do semiárido brasileiro. Conforme Resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) de nº 107, de 27 de julho de 2017, e de nº 115, de 23 de novembro de 2017, o semiárido se define por três critérios: precipitação pluviométrica média anual  $\leq 800$  mm; índice de aridez de Thornthwaite  $\geq 0,50$ ; e, percentual diário de deficiência hídrica  $\geq 60\%$ , considerando todos os dias do ano. Essa definição legal tem fins políticos e incluiu todos os municípios da área nesse contexto climático. Entretanto, na região da Chapada Diamantina, o clima é distinto do semiárido, pois o relevo se apresenta com altitudes médias entre 800 e 1.200 metros, chegando a 2.033 metros no Pico dos Barbados. Essa região elevada, na qual os valores pluviométricos médios anuais atingem 1.068 mm (Pinto *et al.*, 2011), com chuvas orogênicas, constitui localmente uma ilha tropical subúmida anômala. Próximo ao centro da anomalia pluviométrica, em Andaraí, a temperatura média anual é de 23,4 °C e a pluviosidade anual varia entre 580,6 mm a 1.794 mm (Cunha Neta & Rodrigues, 2015). Conforme esses autores, a pluviosidade média mensal tem maior índice nos meses de janeiro (135,8 mm) e fevereiro (135,6 mm), sendo a menor em agosto, quando média atinge 24,7 mm.

Conforme se observa no mapa de isoietas (Figura 5), na área se destacam duas zonas pluviométricas, uma área central anômala com índices médios anuais  $> 800$  mm e seus entornos com valores  $< 800$  mm. Na parte leste da área de estudo os índices pluviométricos são ainda menores. Com base no Atlas Pluviométrico do Brasil (Pinto *et al.*, 2011), a estação climatológica (OMM: 83184 - INMET) de Morro do Chapéu (ao norte da área) está inserida na mesma isoietas dessa região, e indica média anual de 570 mm (período de 1986-2016), caracterizando essa região como típica pluviosidade do semiárido brasileiro. O mesmo fator ocorre nas demais áreas ao oeste e extremo sul, com médias anuais  $< 800$  mm.

#### 4.6 Aspectos de Hidrologia Superficial

A área de estudo engloba a cabeceira do rio Paraguaçu e parte montante de sua bacia hidrográfica.

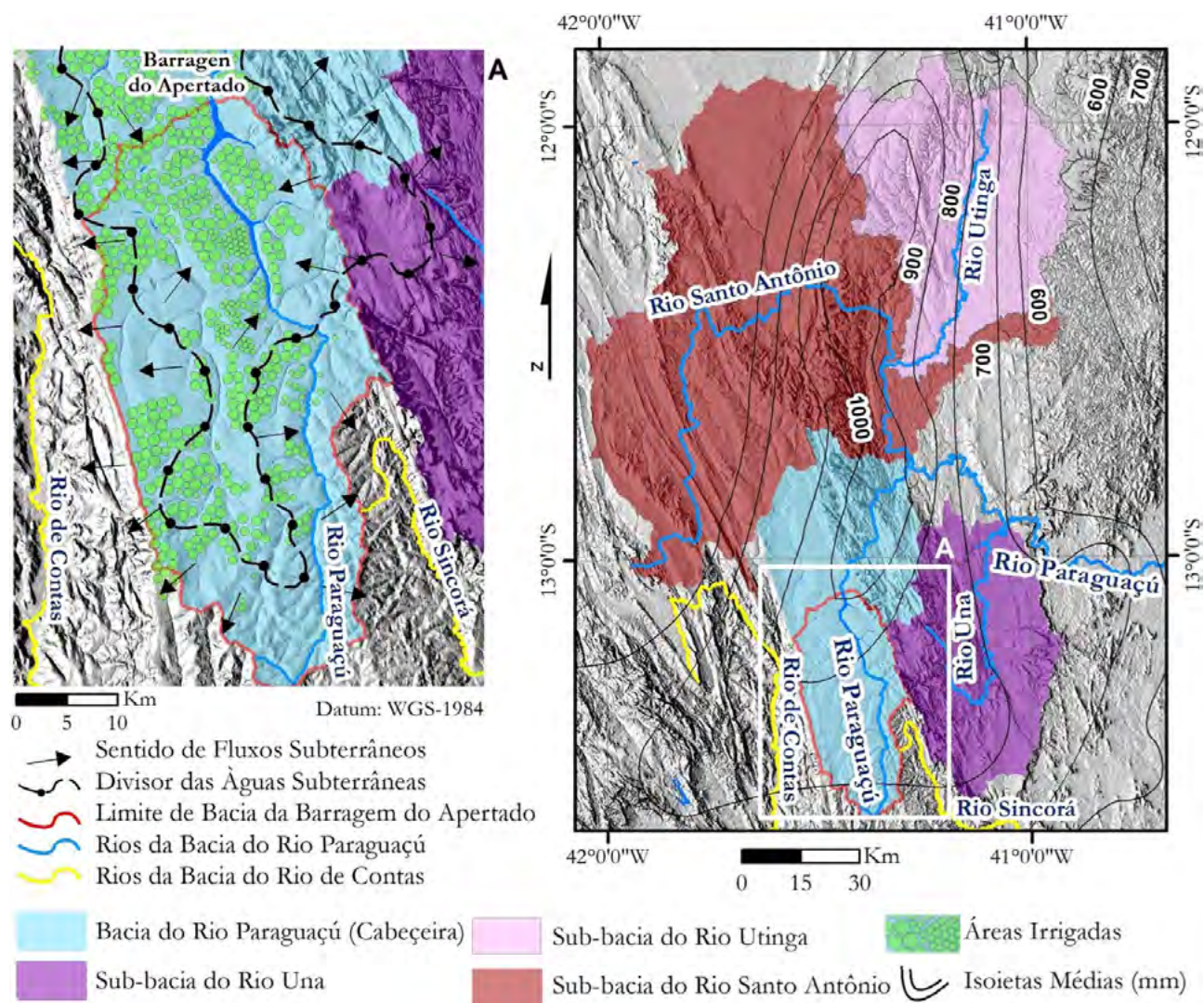
Nessa região, o rio Paraguaçu recebe contribuições de três afluentes principais, o rio Una, o rio Santo Antônio e o rio Utinga (afluente rio Santo Antônio, Figura 5). A sub-bacia do rio Utinga tem grande importância hídrica local que justifica um destaque. Suas drenagens afluentes oriundas da margem leste do rio são todas intermitentes, enquanto os afluentes da margem oeste são perenes. Essa distinção na perenidade se deve a dois fatores principais. Primeiro, devido as diferenças do regime pluviométrico médio anual entre os lados, oeste ( $> 800$  mm) e leste ( $< 800$  mm). Segundo, devido as diferenças hidrogeológicas das unidades que as compõem, no lado oeste ocorre a unidade metassedimentar-fissural que favorecem as vazões de base contínuas, que associadas ao relevo elevado, contribuem para a perenidade dos afluentes. O lado leste ocorre sobre a unidade cárstica-fissural, com relevo baixo, ondulado, com muitas dolinas e poucas drenagens. Além disso, suas drenagens apresentam-se interconectadas aos lineamentos e dolinamentos que funcionam como sumidouros, favorecendo a infiltração e a intermitência das drenagens. Os aquíferos na região da calha do rio Utinga apresentam níveis d'água com profundidade  $> 20$  m (podendo chegar a 85 m ao norte), indicando desconexão com fluxos de bases que mantem o rio perene. Assim, o rio Utinga praticamente recebe águas da região da Chapada Diamantina e pode estar contribuindo com recargas dos aquíferos cársticos e pelíticos-fissurais locais.

A sub-bacia do rio Una, assim como a do rio Utinga, apresenta o mesmo contexto hidrogeoclimático, pois também apresenta drenagens perenes a oeste e drenagens intermitentes a leste, reflexos dos mesmos delimitadores hidrogeológicos e pluviométricos. Sua nascente situa-se sobre a unidade metassedimentar-fissural e seu curso está em grande parte sobre a unidade pelítica-fissural no contato com a unidade cárstica-fissural. Sua conectividade com as águas subterrâneas é observada em duas situações: em suas nascentes que advém da dependência contínua das águas da unidade metassedimentar-fissural, principalmente nos períodos de estiagem; e no trecho final do rio, próximo ao seu exutório no Paraguaçu, onde se encontra também o exutório dos aquíferos da unidade cárstica-fissural com fluxos para norte/noroeste. Ao longo da calha do rio sobre a unidade pelítica-fissural, não há conectividade, pois os aquíferos estão em níveis inferiores ao rio.

O rio Santo Antônio também nasce sobre a unidade metassedimentar-fissural, percorre parte da bacia do Irecê, onde pode receber e/ou fornecer águas para os aquíferos locais. Logo após, o rio percorre novamente a unidade metassedimentar-fissural, recebe novos tributários, e, em seguida, percorre à unidade pelítica-fissural recebendo outros afluentes, incluindo o rio Utinga. Essa sub-bacia hidrográfica envolve vários aspectos hidrogeoclimáticos, uma vez que o rio percorre várias unidades hidrológicas

com regimes pluviométricos distintos. Assim, esse rio tem funções hídras distintas ao longo de seu curso, onde em determinados momentos nasce e depende das águas subterrâneas, em outros, pode alimentar aquíferos locais. Essa variabilidade natural do rio e suas funções hídras, que é comum em rios de grande curso, traz complexidades para gestão das águas conforme previsão

legal atual (baseando-se em bacias hidrográficas). Neste exemplo, é evidente a necessidade de unificação das interdependências das águas subterrâneas e superficiais como condicionantes para a gestão. Caso contrário, não existirá sustentabilidade das partes do sistema hídrico, que em médio ou longo prazo levará ao colapso do sistema completo.



**Figura 5** Mapa parcial da bacia hidrográfica do Rio Paraguaçu, incluindo seus afluentes principais, as sub-bacias dos rios Santo Antônio, Una e Utinga. No recorte A, em detalhe, observa-se a barragem do Apertado e a linha divisória das águas subterrâneas. Os círculos verdes representam áreas irrigadas por pivôs centrais (717 pivôs, ANA & EMBRAPA, 2016). As imagens de fundo são dados SRTM (30 m) sobre efeitos de sombreamento (*hillshade*, azimuth de 265° e ângulo de 60°).

O rio Paraguaçu tem sua nascente sobre a unidade sedimentar-intergranular, onde também está instalada a barragem do Apertado (Figura 5). A superfície da unidade em grande parte é composta por Latossolos arenosos com alta permeabilidade e grande potencial de infiltração das águas de chuvas (relevo semiplano e ondulado). Essa unidade hidrolitológica associada ao regime pluviométrico local são os responsáveis pela manutenção e perenidade do rio Paraguaçu e seus afluentes locais. Devido à sua relevância hídrica, em 1998, foi construída a barragem do Apertado, reservatório de 108,89 milhões m<sup>3</sup> (Souza, 2017). Estima-se que essa barragem libera uma vazão de 1,78 m<sup>3</sup>/s, 20% da vazão regularizada original de 8,90 m<sup>3</sup>/s (Souza, 2017). Conforme dados da ANA e EMBRAPA (2016), em 2014, estavam instalados na sub-bacia da barragem 457 pivôs centrais, totalizando uma área de 29.557 hectares, correspondendo a 26% da área de captação da bacia da barragem. A barragem e seus afluentes são as principais fontes de água para irrigação. Considerando toda unidade sedimentar-intergranular há um total de 717 pivôs centrais dependentes deste sistema hídrico local.

Essa região de cabeceira do rio Paraguaçu condiciona um sistema de aquíferos livres que alimentam tanto a perenidade das nascentes do rio Paraguaçu, quanto as nascentes de afluentes do rio de Contas. Isso denota a importância da caracterização do domínio hidrogeoclimático para a gestão dos RHS. O intenso uso dos RHS local poderá afetar a disponibilidade hídrica de outras bacias, vizinhas ou distantes, porém conexas, trazendo diversas consequências negativas à jusante.

#### 4.7 Domínios Hidrogeoclimáticos

Este estudo propõe a diferenciação da área de estudo em cinco domínios hidrogeoclimáticos (DHGC), como unidade de referência para gestão dos seus RHS. Após simplificação, os principais critérios de distinção DHGC foram: os arcabouços hidrogeológicos das unidades hidrolitológicas e suas conectividades regionais de fluxos; e o padrão pluviométrico regional, subdividido em duas zonas, subúmida com pluviosidade acima de 800 mm/ano e semiárida com pluviosidade abaixo de 800 mm/ano. As características hidrogeoclimáticas principais e as correspondentes áreas de ocorrências de cada domínio (Figura 6) são descritas a seguir.

**i) Domínio Cristalino Semiárido:** caracteriza-se, em termos de reservatórios, pela unidade cristalino-fissural, onde o armazenamento e o fluxo das águas subterrâneas ocorrem nas fissuras. A maior ocorrência desse domínio é encontrada na parte leste, constituindo parte do embasamento da bacia carbonática Una-Utinga e em áreas de

relevo irregular ondulado de média altitude, com morrotes e vales menores (Figura 7). Em termos pluviométricos representa o semiárido com índices inferiores 800 mm/ano. Na parte sul da área, está a cidade de Livramento de Nossa Senhora, com temperatura média anual de 23,9 °C e pluviosidade média de 623 mm/ano (Climate-data, 2018). Na parte leste da área, em Lajedinho, a pluviosidade média é de 678 mm/ano, com temperatura média anual de 21,7 °C (Climate-data, 2018). Ao Sul, aparentemente parte do cristalino está fora do critério semiárido. Entretanto, a região apresenta relevo arrasado e não segue a pluviosidade interpolada (> 800 mm/ano), motivo pelo qual foi considerada área semiárida.

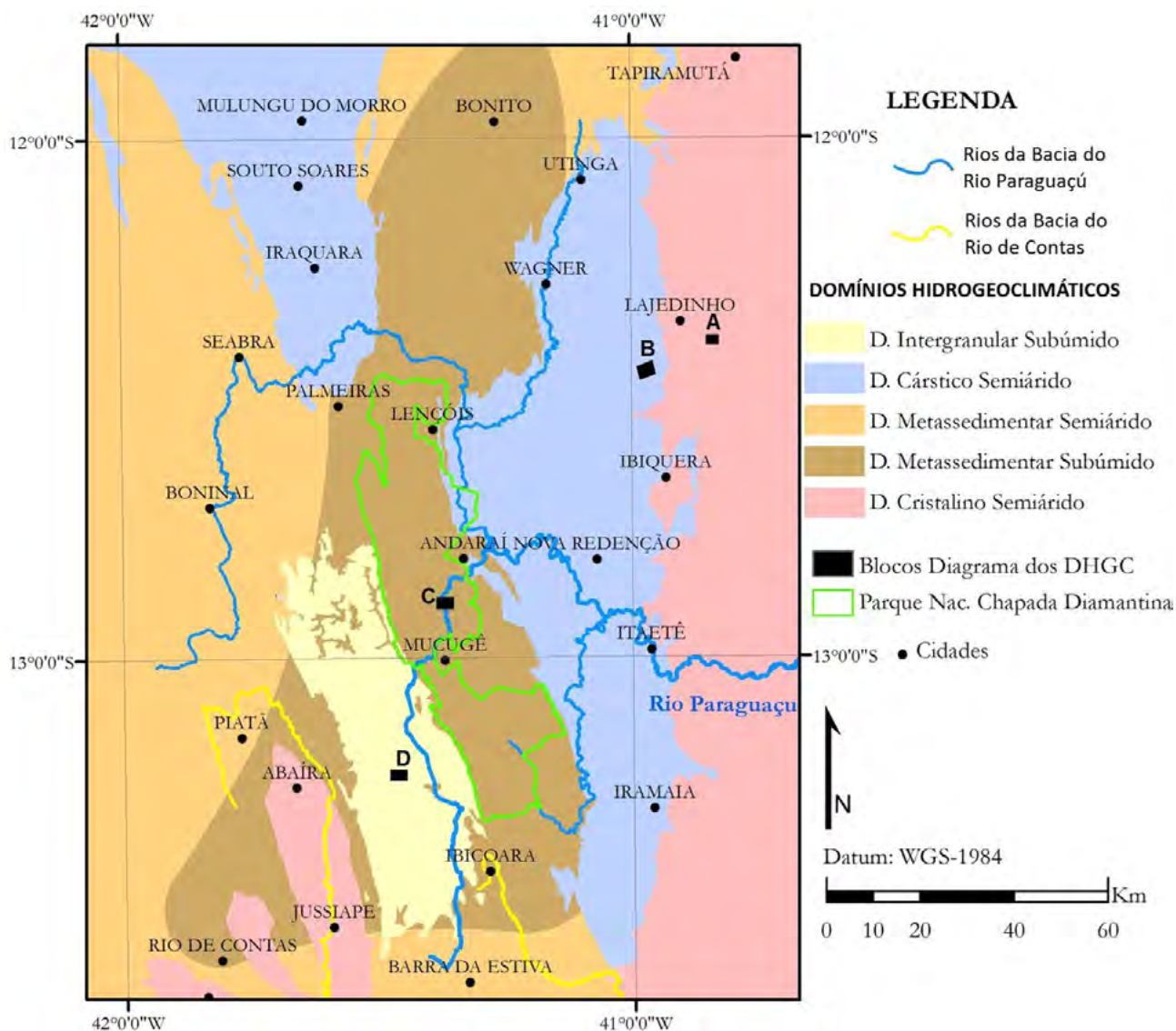
Em termos hidrológicos superficiais, em sua maioria, as drenagens são intermitentes, exceto na parte sul onde algumas drenagens perenes nascem a partir dos exutórios subterrâneos do Domínio Metassedimentar Subúmido. As drenagens intermitentes são de baixa vazão, possuem forte conexão estrutural com lineamentos regionais, e, por vezes alimentam os reservatórios subterrâneos nos períodos chuvosos. Esse domínio apresenta solos mais espessos, que dificultam as recargas dos aquíferos, sendo sua tipologia principal constituída de Argissolos Vermelho-Amarelos, de Latossolos Vermelhos/Amarelos e de Cambissolos. A vegetação é tipicamente de Caatinga nas áreas baixas, com resquícios de mata alterada nas áreas mais altas.

**ii) Domínio Metassedimentar Subúmido:** caracteriza-se em termos de reservatório pela unidade hidrolitológica metassedimentar-fissural, com predominância de porosidade fissural e localmente com dupla porosidade associada. Geralmente possui relevo elevado, ondulado, com alta declividade. Trata-se de um pacote rochoso acamadado, dobrado e intensamente fraturado (Figura 8). Em termos de solos ocorrem os Neossolos flúvicos e litólicos. Na vegetação predominam os campos rupestres ou pradaria nos topos, floresta estacional e mata nas encostas e vales. A precipitação média é superior 800 mm/ano, podendo chegar a 1.800 mm/ano, enquanto a temperatura média anual é de 23,9 °C (Climate-data, 2018). Em termos de hidrologia superficial, representa as principais fontes e nascentes que mantêm as bacias hidrográficas na área, reflexo do alto índice pluviométrico, da hidrogeologia, das altitudes elevadas e da dimensão da área de ocorrência. Esse domínio funciona como uma “caixa d’água” natural, pois recebe elevados níveis de precipitação, infiltração, acúmulo de água e descarga, formando rios perenes com alta

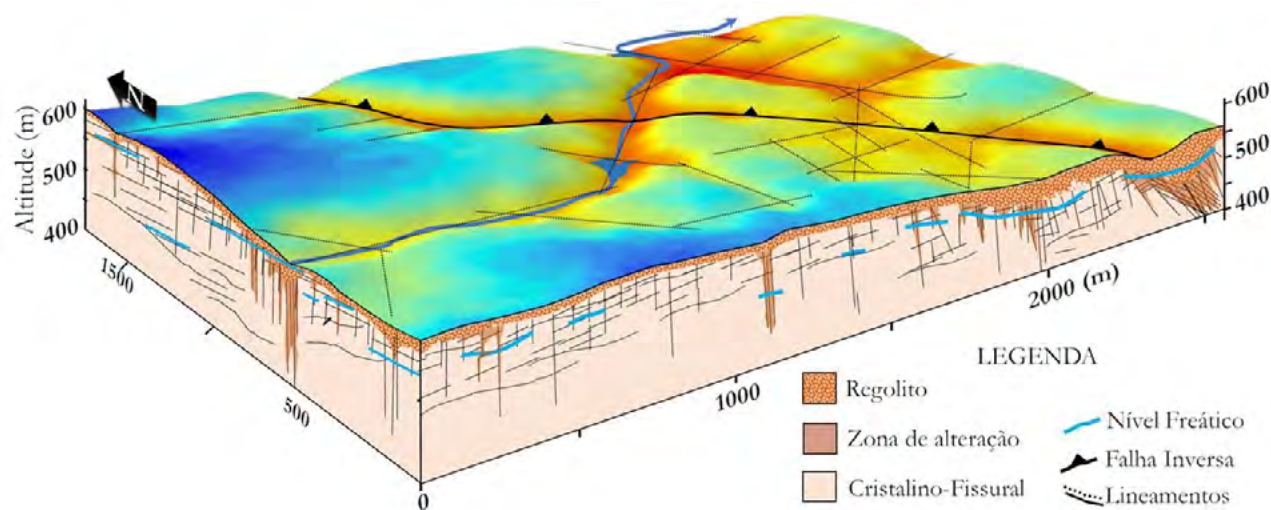
variabilidade de vazão em função das intensidades irregulares de chuvas.

**iii) Domínio Metassedimentar Semiárido:** também caracteriza-se em termos de reservatório pela unidade metassedimentar-fissural. Apresenta-se nas mesmas condições de solos (Neossolos flúvicos e Latossolos) e de relevo (alta declividade), com pacote rochoso acamado/dobrado e intensamente fraturado. Em algumas áreas ocorrem porções de sedimentos inconsolidados (Figura 8). Diferencia-se

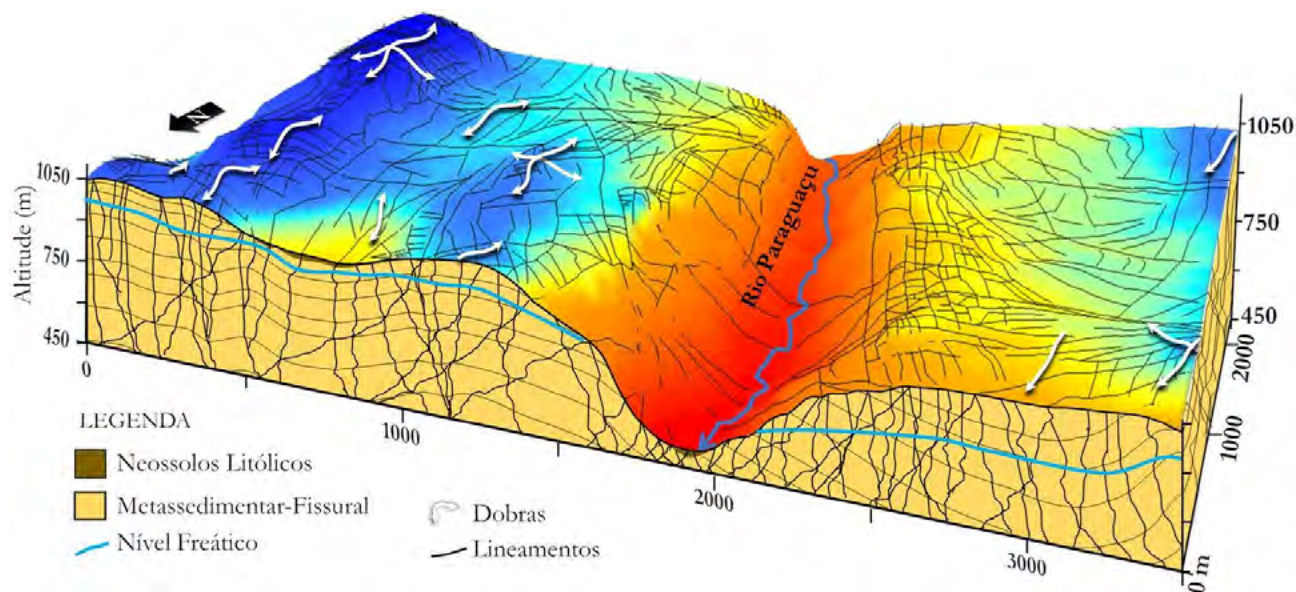
do domínio descrito anteriormente principalmente pela vegetação (predomina vegetação Caatinga, com restritas matas densa nas drenagens) e pela pluviosidade (precipitação média < 800 mm/ano). Na cidade de Boninal, a precipitação média é de 562 mm/ano, a temperatura média anual é de 21°C (Climate-data, 2018). A hidrologia superficial também é importante na área de estudo, representando o domínio onde nascem os rios Santo Antônio (Rio Roxó, segundo a denominação local) e de Contas.



**Figura 6** Mapa de DHGC. Em destaque com letras A, B, C e D estão os quatro blocos-diagramas 3D que representam, em figura esquemática, os principais sistemas de aquíferos dos cinco domínios (ver nas Figuras 7, 8, 9 e 10).



**Figura 7** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cristalino Semiárido. Sua localização é mostrada pelo ponto A na Figura 6. Em subsuperfície, observam-se as fissuras multidirecionais com zonas conectadas/desconectadas que permitem os fluxos e o armazenamento dos RHS. O sistema fissural é complexo e propicia diferentes profundidades dos níveis d’água. Foram usados dados SRTM para modelagem do relevo e interpretação dos lineamentos.

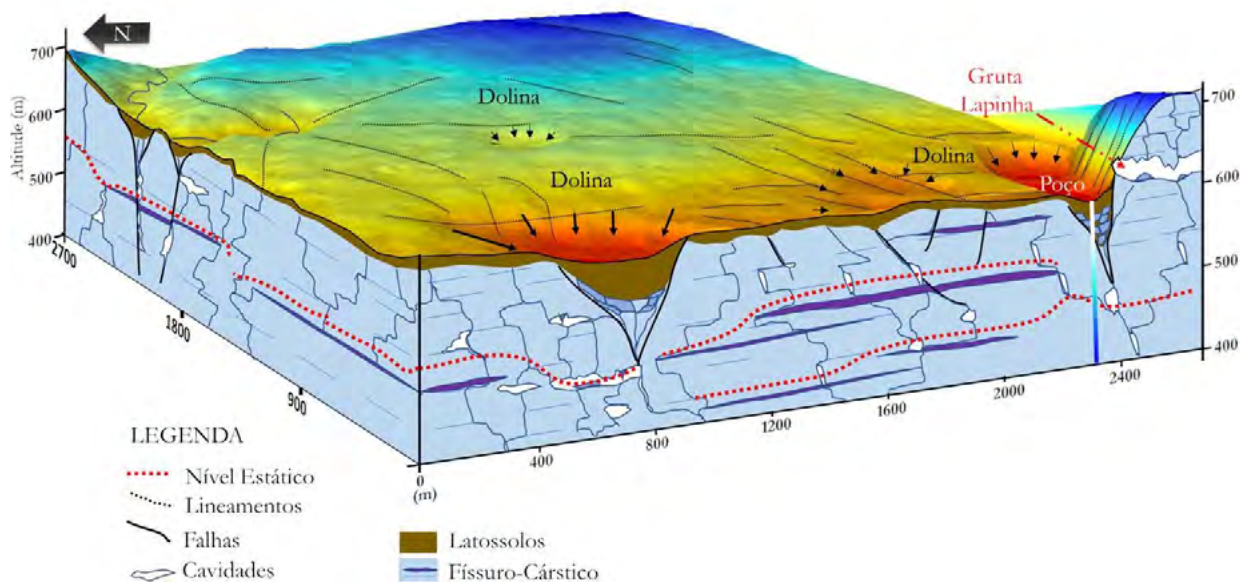


**Figura 8** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Metassedimentar Semiárido e Subúmido. Esses dois DHGC se diferenciam basicamente pelo clima. Sua localização é mostrada pelo ponto B na Figura 6. Em subsuperfície, observam-se os acamamentos dobrados conectados ao intenso sistema de fraturas verticais que atingem a superfície. Essas áreas têm raras ocorrências de solos, permitindo percolação e infiltração direta das águas de chuvas.

**iv) Domínio Cárstico Semiárido:** em termos de reservatórios, é representado pela unidade cárstica-fissural integrada a unidade pelítica-fissural, dispostas em duas áreas (bacias do Irecê e Una-Utinga). Na Figura 9, a unidade pelítica-fissural está integrada ao domínio cárstico devido a sua coexistência integral na base desses aquíferos, o que garante isolamento hidráulico com outras unidades. O isolamento hidráulico regionalmente permitirá uma gestão independente do DHGC Cárstico Semiárido. Isso significa que impactos consequentes do uso dos RHS neste DHGC devem ter pouco ou nenhum efeito nos demais domínios. Em ambas as bacias predominam Latossolos Vermelho e Amarelo, e Cambissolos. Na bacia do Irecê a altimetria varia entre 630 a 930 m, a precipitação média é de 664 mm/ano na cidade Mulungu do Morro, com temperatura média anual de 21,5 °C (Climate-data, 2018). Nesta região a vegetação é predominantemente Caatinga alterada e áreas de uso agropecuário irrigada. Na bacia do Una-Utinga, a altimetria varia entre 320 a 790, com precipitação média de 763 mm/ano em Wagner, e temperatura média anual de 22,9 °C (Climate-data, 2018). Nessa última região a Caatinga predomina

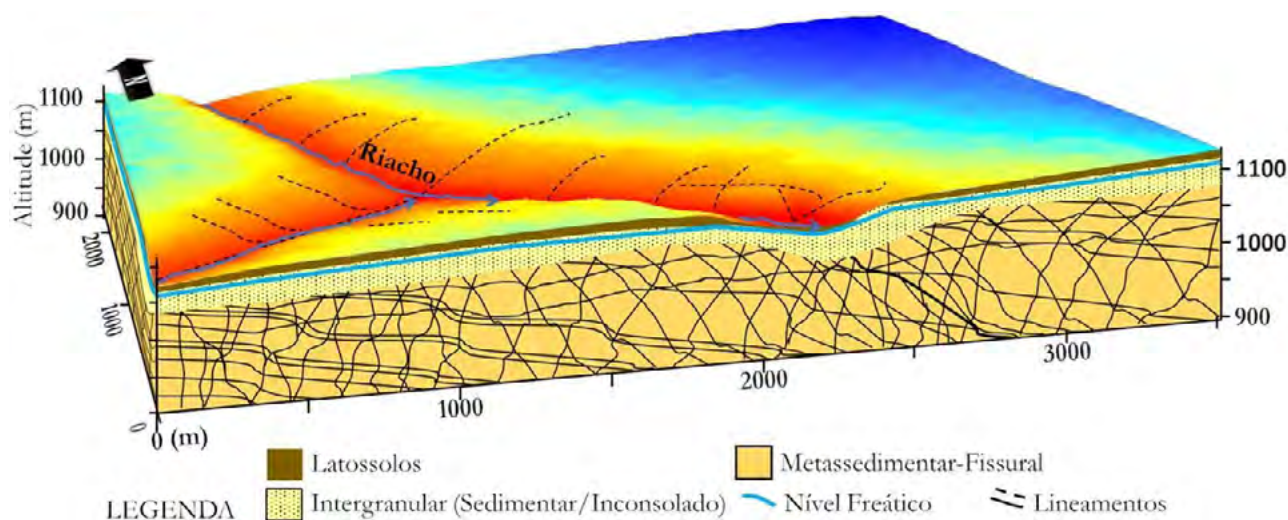
exclusivamente na parte leste da bacia. No lado oeste ocorre floresta estacional, essa distinção de vegetação se deve as influências climáticas da zona proximal subúmida da Chapada da Diamantina. Importante destacar que em ambas as bacias se predomina pluviosidades médias < 800 mm/ano.

**v) Domínio Intergranular Subúmido:** é caracterizado pela área da unidade porosa-intergranular e pluviosidades médias > 800 mm/ano (Figura 10). Na sua base e no seu entorno, ocorre a unidade metassedimentar-fissural, que devido ao seu potencial hídrico potencializa as capacidades hídricas subterrâneas locais (seção X-Y, Figura 4). Nessa área, ocorre basicamente Latossolos e floresta estacional, que foi substituída em grande parte pelo uso agropecuário. Essa região representa as nascentes do rio Paraguaçu e tem grande importância hídrica superficial e subterrânea para o estado. Esse DHGC, devido à sua importância hídrica, merece distinção e foco especial para gestão, pois seu alto potencial hídrico o torna mais vulnerável. Seus aquíferos livres, rasos e de alta permeabilidade são mais susceptíveis à contaminação, principalmente se associados ao uso intensivo de agricultura irrigada.



**Figura 9** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Cárstico Semiárido. A localização do bloco é mostrada pelo ponto C da Figura 6. Em subsuperfície, observa-se o sistema de fluxos que segue as fissuras irregulares associadas as cavidades de dissolução. Essas cavidades podem ter centenas de metros, funcionando como rios e/ou bolsões subterrâneos de águas.





**Figura 10** Bloco-diagrama representando os sistemas de aquíferos do Domínio Sedimentar Subúmido. A localização do bloco é mostrada pela letra D na Figura 6. Em subsuperfície observam-se dois sistemas de aquíferos, o sedimentar-intergranular arenoso interconectado ao metassedimentar-fissural. O recorte está sobre um afluente do rio Paraguaçu, mostrando relevo semiplano e vales encaixados nos lineamentos regionais.

## 5 Considerações Finais

A disponibilidade das águas superficiais e subterrâneas é resultante dos processos ambientais que favorecem a sua existência nos diferentes reservatórios, sendo controladas por diferentes condições. As regras de uso e gestão devem respeitar as condições ambientais de disponibilidade (as condições hidrogeoclimáticas), caso contrário, não se constituirão em recursos naturais sustentáveis a longo prazo. A variabilidade das características hidrogeoclimáticas é ampla e por vezes complexas, entretanto, sua análise permite identificar os fatores preponderantes na disponibilidade e no controle hídrico subterrâneo. Com isso, nesse estudo, foram analisados e propostos critérios técnicos multidisciplinares que levaram à definição de DHGC como unidade base para gestão das águas subterrâneas.

Os domínios foram definidos com base na integração de dados georreferenciados, seguindo-se a intenção de conhecer e entender a lógica de armazenamento e fluxo regional subterrâneo, as condições climáticas sobrepostas e as interfaces com as águas superficiais. Assim, foram definidos cinco DHGC para gestão dos RHS: Domínio Metassedimentar Subúmido; Domínio Metassedimentar Semiárido; Domínio Cristalino Semiárido; Domínio Cárstico Semiárido; e, Domínio Intergranular Subúmido. Os critérios simplificados que levaram a essa definição foram: as tipologias de unidades hidrolitológicas dos reservatórios subterrâneos e suas condições de fluxos regionais; a precipitação média anual ( $> 800$  mm = subúmido;  $< 800$

mm = semiárido); e, as interrelações de dependência natural dos fluxos superficiais com os fluxos subterrâneos como reflexos do relevo e das propriedades hidráulicas.

Para a área de estudo, concluiu-se que os aspectos de uso e ocupação do solo que poderiam impactar na capacidade de recarga e qualidade das águas não seriam considerados para distinção de domínios. Isso criaria um excesso de complexidade e dificuldades para o gestor. Esses aspectos, se relevantes, podem atuar como condicionantes na definição de critérios específicos para outorga e/ou planejamento de uso dos RHS. A definição de critérios de outorgas e/ou autorização de usos dos RHS devem seguir as premissas técnicas específicas de cada DHGC, respeitando suas limitações de disponibilidade hídrica no tempo e no espaço.

Importante lembrar que, em cada DHGC, a gestão deve seguir a premissa de monitoramento contínuo, devendo minimamente avaliar os parâmetros de variação dos níveis potenciométricos e a qualidade da água. Assim como, as variáveis que condicionam a disponibilidade hídrica e interferem na qualidade da água (por exemplo, índices pluviométricos, novos usos intensivos de ocupação do solo e, em especial, nas áreas de recarga).

Os cinco DHGC definidos na área de estudo possuem particularidades na disponibilidade hídrica e são relativamente autônomos, permitindo uma gestão independente. Entretanto, entre os DHGC existe certa conectividade por meio de águas superficiais, o que ressalta a importância da gestão dos RHS estar também sob a ótica regional. Nas áreas de exutórios subterrâneos existe

conectividade direta dos fluxos subterrâneos com os rios sobrejacentes. Essa conectividade deve ser analisada na definição dos planos de uso e outorgas, pois, dependendo da forma e intensidade de uso, poderá afetar o equilíbrio de interdependência atual e gerar consequências indesejadas. Sempre que houver riscos naturais e/ou novas interferências antrópicas nos DHGC que podem impactar a disponibilidade ou qualidade das águas, o plano de gestão dos RHS deve ser revisado.

Na área de estudo, constatou-se que o DHGC Metassedimentar Subúmido e o Intergranular Subúmido são os mais relevantes para retenção das águas de chuvas, para armazenamento de águas subterrâneas e para manutenção das drenagens superficiais de todas as bacias hidrográficas da região. Isso faz desses domínios, os mais importantes e estratégicos para a região, devendo ser considerados como foco de atenção para gestão, com adequado monitoramento e limitação de uso com práticas sustentáveis para os recursos hídricos. O DHGC Cárstico Semiárido, apesar de ter restrita disponibilidade hídrica, apresenta boas condições de recarga e alto potencial de armazenamento subterrâneo, porém, elevada vulnerabilidade à exaustão das reservas. Isso gera, em termos de gestão, a necessidade de um monitoramento detalhado dos usos com acompanhamento, se possível, em tempo real. O DHGC Cristalino Semiárido é o mais restrito em termos de disponibilidade hídrica, porém, possui maior área de ocorrência e significativa camada de solos. Assim, apesar da baixa disponibilidade hídrica, esse domínio representa áreas com aquíferos mais protegidos, favorecendo maior diversidade de usos.

Por fim, conclui-se que o planejamento e a gestão sustentável dos RHS devem iniciar pela definição dos DHGC, que devem ser a unidade de área geográfica base para condicionar a definição dos critérios de outorgas nos usos dos RHS, assim como, para a identificação dos limites sustentáveis nos diferentes tipos de usos no tempo. Os dados e as análises que permitem a definição dos DHGC também devem ser usados como base para o planejamento e a identificação dos locais de monitoramento e das áreas de recarga estratégicas. Com base nos DHGC, o órgão gestor poderá ter previsibilidade dos possíveis impactos da implementação de projetos no tempo e prevenir problemas, garantindo assim, uma melhor relação custo/benefício para os investidores, oferecendo ainda segurança hídrica necessária aos empreendimentos.

## 6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES-Código de Financiamento 001). Agradecimento especial ao Programa de Pós-Graduação de Geociências Aplicadas e Geodinâmica (PPGAG/IG) do

Instituto de Geociências da UNB pelo apoio, e a CPRM – Serviço Geológico do Brasil pela disponibilização de dados.

## 7 Referências

- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364.
- ANA & EMBRAPA. 2016. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - ano 2014. Relatório Síntese, Agência Nacional de Águas, 33p. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br>>. Acessado em: 15 setembro 2018.
- Arraes, T.M. 2008. *Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado. 125p
- Arraes, T.M.; Campos, J.E.G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 37: 81-89.
- Carvalho, L.M. & Ramos Barreto, M.A. 2010. *Geodiversidade do estado da Bahia*. Salvador, BA, CPRM, 184p.
- Brasil. 1988. Constituição Federal. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acessado em: 1 fev. 2017.
- Brasil. 1997. Lei das Águas. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acessado em: 2 fev. 2017.
- CBPM. 2015. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Disponível em: <[http://www.cbpm.com.br/paginas/geolo\\_nabahia.php](http://www.cbpm.com.br/paginas/geolo_nabahia.php)>. Acessado em: 15 out. 2017.
- Climate-data, org., 2018. Clima Bahia. <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia/>>. Acesso em: 22 de ago. 2018.
- CPRM/SGB. 2009. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil 2009. RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=35&inford=1463>>. Acessado em: 25 mar. 2016 e 02 nov 2018.
- Cunha Neta, A.M.M. & Rodrigues, D.P. 2015. Sistema de Informações Geográficas aplicada a análise das características climatológicas do município de Andaraí - BA. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 17, João Pessoa-PB, 2015. Resumos Expandidos, Anais SBSR, João Pessoa, INPE, p. 6153-6160.
- Dalton de Souza, J.; Kosin, M.; Melo, R.C.; Santos, R.A.; Teixeira, L.R.; Sampaio, A.R.; Guimarães, J.T.; Vieira, B.R.; Borges, V.P.; Martins, A.A.M.; Arcanjo, J.B.; Loureiro, H.S. C. & Angelim, L.A.A. 2003. Mapa geológico do Estado da Bahia. 1 mapa, 120 cm x 80 cm. Escala 1:1.000.000.
- Diniz, J.A.; Monteiro, A.B; Silva, R.C. & Paula, T.L.F. 2014. *Manual de cartografia hidrogeológica*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Recife, PE, 119f.
- Farr, T.G.; Rosen, P.A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin,

- M.; Burbank, D. & Alsdorf, D. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review of Geophysics*, 45(2): 1-33.
- Google Earth PRO 2018. Imagens satelitais de diversas resoluções e épocas. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acessado em: jan. 2018.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acessado em: dez 2018.
- INEMA. 2018. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado da BAHIA. Portaria n. 8578, Instruções Normativas n. 01, 10 e 15. Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/legislacao/normas-tecnicas-e-portarias/>>. Acessado em: dez. 2018.
- Jacomine, P.K.T.; Cavalcanti, A.C.; Ribeiro, M.R.; Montenegro, J.O.; Burgos, N.; Melo Filho, H.F.R. & Formiga, R.A. 1977. Levantamento exploratório reconhecimento de solos da margem direita do rio São Francisco, estado da Bahia. 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1. 1.000.000.
- Macedo, M.H.F. & Bonhomme, M.G. 1984. Contribuição à cronoestratigrafia das formações Caboclo, Bebedouro e Salitre na Chapada Diamantina (BA) pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. *Revista Brasileira de Geociências*, 14: 153-163.
- Pereira, R.G.F.A. 1998. *Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do Carste da Bacia do Rio Una, Borda Leste da Chapada Diamantina (Município de Itaeté, Estado da Bahia)*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 128p.
- Pinto, E.J.A.; Azambuja, A.M.S.; Farias, J.A.M.; Salgueiro, J.P.B. & Pickbrenner K. (Coords.) 2011. Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. 1 mapa: 120 cm x 80 cm. Escala 1.5:000.000.
- Pontes, C.H.C.; Lastoria, C. & Pereira, J.S. 2007. Panorama atual da legislação brasileira com referência à gestão da água subterrânea. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12, São Paulo-SP, 2007. Resumos Expandidos, São Paulo, p. 1-18.
- Pordata, 2019. Base de Dados Portugal Contemporâneo. Disponível em: <<https://www.pordata.pt/Portugal>>. Acessado em: 25 jan. 2019.
- Rebouças, A.C. 2002. A política nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas. *Revista Águas Subterrâneas*, 16 (1): 1302.
- Santos H.; Carvalho Júnior, W.; Dart, R.; Áglio, M., Sousa, J.; Pares, J.; Fontana, A.; Martins, A. & Oliveira, A. 2011. O novo mapa de solos do Brasil - legenda atualizada. 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1:5.000.000.
- Silva, A.J.C.L.P. 1994. *O supergrupo espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 186p.
- Souza, C.N. 2017. *Avaliação dos usos da água na Barragem do Apertado Mucugê-BA*. Engenharia Florestal, Universidade Federal do Recôncavo Baiano, Trabalho Final de Curso, 51p.
- USGS Data Center SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). 2017. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 02 de nov. 2017.

Recebido em: 20/07/2020

Aprovado em: 19/10/2020

### How to cite:

Augusto, V.A.; & Campos, J.E.G. 2021. Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 36253. DOI 1982-3908\_2021\_44\_36253